

**Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz
polimérica, reforçados com fibras de juta**

INEGI

Natália Arieira Veiga

Relatório do Projeto Final / Dissertação do MIEM

Orientador no INEGI: Engenheira Tânia Esmeralda Rodrigues Estêvão

Orientador na FEUP: Prof. José Luís Soares Esteves



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Janeiro de 2014

À minha família,
Pelo amor e apoio incondicional.

Resumo

A aplicação de materiais compósitos tem vindo a crescer em áreas de engenharia de elevada resistência e de peso reduzido. Estes materiais são a junção de dois ou mais materiais com características distintas, formando um material com natureza heterogénica o que impõe a necessidade de uma caracterização mecânica rigorosa de modo a estabelecer os seus limites de aplicabilidade.

O uso de materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais tem vindo a crescer, sendo estes uma alternativa às fibras sintéticas (mais precisamente às fibras de vidro). O recurso às fibras naturais é uma alternativa biodegradável, renovável e de baixo custo, despertando o interesse de diversas empresas e investigadores para dar resposta à preservação ambiental.

A presente dissertação trata o estudo do comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibra de juta. O reforço está representado na forma de tecido bidirecional com fibras longas e na forma de manta com fibras curtas distribuídas aleatoriamente. Os ensaios mecânicos realizados neste trabalho foram: ensaios de flexão em três pontos (ASTM D790-03) e ensaios à tração (ASTM D 3039/D 3039M - 00). Desta forma obteve-se os valores da rigidez, tensão máxima e coeficiente de Poisson para se poder caracterizar o material à fratura em modo I, recorrendo-se à norma ASTM d 5045 – 99.

No presente trabalho, foram caracterizados os compósitos obtidos pelas diferentes formas de reforço, matriz polimérica e processo de obtenção do compósito. Vai-se efetuar uma análise crítica dos resultados obtidos à flexão, tração e fratura em modo I e vai-se expor propostas para trabalhos futuros.

Palavras-chave

Materiais compósitos, fibras de Juta, matriz termoendurecível, resina de epóxico, resina poliéster insaturado, pré-impregnados, autoclave, moldação manual, ensaios mecânicos.

Abstract

The application of composite materials has been growing in areas of engineering at high strength and light weight. These materials are union of two or more materials with dissimilar characterizes they are forming a heterogeneous material, which imposes the need for a meticulous mechanical characterization to establish its limits of applicability.

The use of polymeric matrix composite materials reinforced with naturel fibers has been growing and they are alternative to synthetics fibers (more precisely glass fibers). The use of natural fibers is a biodegradable, renewable and low-cost alternative, they are attracting the interest of several companies and researchers to respond to environmental preservation.

This present dissertation deals with the study of mechanical behavior of reinforced jute fiber. The reinforcement can be a long and bidirectional fiber weave or short fibers randomly distributed on a blanket. The mechanical test execute in this dissertation were: testing three point bending (ASTM D790-03) and tensile tests (ASTM D 3039 / D 3039M - 00). Thus were obtained the values of stiffness, maximum tension and ratio of Poisson characterizing the material to toughness in mode I, resorting to the standard ASTM d 5045 – 99.

The present work characterizes composites obtained with different forms of reinforcement, the polymeric matrix and different casting modes. The work will present a critical analysis of the results will bending, tensile and fracture mode I and will be exposing proposals for future work.

Keys-words

Composite materials, jute fibers, thermosetting matrix, epoxy resin, unsaturated polyester resin, prepregs, autoclave, hand ply-up, mechanic test.

Agradecimentos

Ao Professor José Esteves, orientador da presente dissertação, pela dedicação, disponibilidade e incentivo que apresentou durante o tempo de realização deste trabalho. A sua ajuda foi imprescindível para a conclusão do mesmo.

À Tânia Estêvão pela ajuda na componente experimental e por todo o apoio prestado.

Às instituições: INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) mais especificamente UMEC (Unidade de Materiais Compósitos) e DEMec (Departamento de Engenharia Mecânica).

Às pessoas da UMEC, especialmente ao Paulo Nóvoa por todos os comentários dados ao longo do trabalho.

Andreia Durães pela disponibilidade e ajuda prestada nos ensaios experimentais. Ao Sertório Lares, pela disponibilidade em emprestar equipamento necessário para a elaboração prática deste trabalho.

A todos aqueles que direta e indiretamente me apoiaram ao longo deste percurso.

Aos meus pais e irmãos, que são o meu apoio a todos os níveis.

A todos os meus colegas e amigos de curso pela amizade. Um agradecimento especial à Fabiane Loureiro e ao Tiago Mota pelo companheirismo, que foi fundamental para ultrapassar as muitas dificuldades com que me deparei.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Motivação	1
1.3	Resumo de capítulos	2
2	Estado da arte.....	3
2.1	Matriz	3
2.1.1	Matriz polimérica	4
2.2	Reforço.....	6
2.2.1	Classificação das fibras quanto à orientação	6
2.2.2	Classificação quanto á forma do reforço	6
2.2.3	Fibras vegetais	9
2.3	Pré-impregnados	15
2.3.1	Processo de pré-impregnação	16
2.4	Métodos de fabrico de materiais compósitos.....	17
2.4.1	Moldação manual	17
2.4.2	Moldação em autoclave	18
2.5	Reciclagem de materiais compósitos	19
3	Propriedades mecânicas dos materiais compósitos	21
3.1	Introdução	21
3.1.1	Análise geral de sólidos anisotrópicos.....	21
3.1.2	Relações elásticas para uma camada de um compósito.....	24
3.1.3	Propriedades mecânicas do compósito	25
3.1.4	Regra das misturas.....	27
3.1.5	Coeficiente de Poisson	29
4	Mecânica da fratura	31
4.1	Introdução	31
4.2	Teoria de Griffith	31
4.3	Modos de solicitação	33
4.4	Mecânica da fratura em compósitos reforçados com fibras.....	34
4.4.1	Rotura de materiais compósitos.....	34
4.5	Método experimental de obtenção da tenacidade em estado de deformação plana...36	

5	Procedimento experimental	39
5.1	Materiais	39
5.1.1	Resina	39
5.1.2	Reforço	39
5.2	Produção das placas	40
5.2.1	Preparação das fibras	40
5.2.2	Produção dos pré-impregnados	41
5.2.3	Moldação manual	42
5.2.4	Autoclave.....	43
5.2.5	Preparação dos provetes	44
6	Resultados experimentais	47
6.1	Ensaio à flexão	48
6.2	Ensaio à tração	54
6.2.1	Apresentação de resultados	56
6.2.2	Discussão de resultados	63
6.3	Ensaio à tenacidade.....	64
6.3.1	Apresentação de resultados para os provetes CT	64
6.3.2	Apresentação de resultados para os provetes SENB	69
7	Conclusões.....	73
8	Trabalhos futuros.....	75
9	Referências	77
	Anexos.....	79
	Anexo A: Fichas técnicas das resinas.....	79
	Anexo B: Fichas técnicas dos extensómetros.....	87
	Anexo C: Suporte para a abertura da pré-fenda	94

Índice de figuras

Figura 1 Fases de um material compósito.[3]	3
Figura 2 Classificação dos materiais compósitos quanto à matriz [6].	3
Figura 3 Classificação de matérias compósitos segundo o reforço [8].	7
Figura 4 Diferentes tecidos, a) <i>plane weave</i> , b) <i>twill weave</i> e c) <i>satin weave</i> [4].	8
Figura 5 Classificação das fibras naturais[10].....	10
Figura 6 Caule de uma planta juta [10].	12
Figura 7 Representação esquemática de uma microfibrila [18].	13
Figura 8 Curva tensão-deformação de uma planta lignocelulosica [21].	15
Figura 9 Forma de um pré-impregnado [23].	16
Figura 10 Esquema de processo de pré-impregnação automático [23].	16
Figura 11 Classificação dos processos de fabrico de um compósito de acordo com a resina usada [24].	17
Figura 12 Processo de moldação manual[25].....	18
Figura 13 Autoclave.	19
Figura 14 Representação esquemática de uma bolsa de vácuo [27].....	19
Figura 15 Camada compósita reforçada com fibras unidireccionais [30].....	22
Figura 16 Rotação de referencial em torno do eixo z [8].	25
Figura 17 Sequência de empilhamento considerada [8].	27
Figura 18 Compósito laminar onde está aplicado uma carga nas condições de isodeformação [31].	28
Figura 19 Compósito laminar onde está aplicado uma carga nas condições de isotensão [31].	29
Figura 20 Tipos de tecido [34].	30
Figura 21 Fissura interna a toda a espessura do sólido [36].	31
Figura 22 Modos de deformação [4].	33
Figura 23 Estado de tensão na vizinhança de uma fenda[36].	34
Figura 24 Representação esquemática dos mecanismos de rotura de um material compósito[35].....	35
Figura 25 Configuração dos provetes a) CTS e b) SENB E399 [38].	37
Figura 26 Curva carga-deslocamento[38].	37
Figura 27 Representação do reforço com as diferentes orientações das fibras, a) cordões das fibras com um ângulo de 90° , b) cordões das fibras com um ângulo de 45° e c) manta.	40
Figura 28 Secagem das fibras no forno.	41

Figura 29 Sacos hermético com a fibra.	41
Figura 30 Produção do pré-impregnado.	42
Figura 31 a) Pré-cura no forno, b) armazenamento em ambiente de refrigeração.	42
Figura 32 Etapas da moldação manual de uma manta, a) impregnação, b) aperto e c) placa. .	43
Figura 33 Pré-impregnado após a refrigeração.....	43
Figura 34 Saco de vácuo.....	44
Figura 35 Máquina de corte com disco diamantado.....	45
Figura 36 Provete com tabs construídos com um material compósito.	45
Figura 37 a) Tabs de alumínio e zona do provete a ser colado, b) fixação dos tabs durante a cura do adesivo epóxico estrutural.	46
Figura 38 Esquema do formato dos provetes de flexão da norma ASTM D 790 – 03.....	48
Figura 39 Ensaio de flexão.	48
Figura 40 Esquema do formato dos provetes de tração da norma ASTM D 3039/D 3039M. .	55
Figura 41 Provete com extensômetros colados da HBM.	55
Figura 42 Provete com extensômetro colado da RS.....	55
Figura 43 Extensômetro de pinças.	56
Figura 44 Representação de um provete CT sem a pré-fenda.	65
Figura 45 Abertura da pré-fenda.	65
Figura 46 Esquema da montagem, para se observar a propagação da fenda.....	65
Figura 47 Modo para se obter o valor de “a” quando se atinge a carga máxima.	67
Figura 48 Dimensões do provete SENB.....	69
Figura 49 Modo para se obter o valor de “a” quando se atinge a carga máxima para o provete SENB.	70
Figura 50 Provete SENB após o ensaio de fatura em modo I.	70

Índice de tabelas

Tabela 1 Propriedades mecânicas da resina de poliéster e epóxico [7].	6
Tabela 2 Comparação de algumas propriedades de fibras naturais com a fibra de vidro [10].	11
Tabela 3 Fibras de origem vegetal mais comercializadas (2010) [15].	12
Tabela 4 Maiores produtores de juta do ano 2011 [16].	13
Tabela 5 Composição química da fibra de juta [17].	14

Tabela 6 Rigidez, carga máxima e deformação das resinas usadas no trabalho (valores dados pela ficha das resinas).....	39
Tabela 7 Peso do reforço antes e depois da secagem.	40
Tabela 8 Temperatura e tempo de secagem.....	40
Tabela 9 Descrição das placas quanto á orientação, tipo de reforço, processo de moldação, matriz polimérica usada e número de camadas.	44
Tabela 10 Dimensões das placas e quantidade de fibra.....	47
Tabela 11 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JRAPP0101.....	48
Tabela 12 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JRAP0105.....	49
Tabela 13 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JRMP0105.	49
Tabela 14 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JB45APP0601.....	50
Tabela 15 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JB45AP0606.....	51
Tabela 16 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JB45MP0606.	51
Tabela 17 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JU0AP0601.....	52
Tabela 18 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JU0AP0605.....	52
Tabela 19 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JU0AM0605.	53
Tabela 20 Espessura média, quantidade de fibra, módulo de Young, tensão máxima e deformação média das placas ensaiadas à flexão.	53
Tabela 21 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JRAP0106.....	56
Tabela 22 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45APP0602.....	56
Tabela 23 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45AP0605.....	57
Tabela 24 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45MP0606.	57
Tabela 25 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JU0APP0602.	57

Tabela 26 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JU0AP0606.....	57
Tabela 27 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JU0MP0602.....	57
Tabela 28 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JRAPP0102.....	58
Tabela 29 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JRAP0102.....	58
Tabela 30 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45APP0602.....	59
Tabela 31 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45AP0605.....	59
Tabela 32 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45MP0606.....	60
Tabela 33 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JUOAPP0602.....	61
Tabela 34 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JUOAP0606.....	61
Tabela 35 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JUOMP0606.....	62
Tabela 36 Valores médios dos resultados obtidos no ensaio de tração.....	62
Tabela 37 Valores médios de alguns parâmetros para o cálculo do fator de intensidade de tensão das placas curadas em autoclave.....	67
Tabela 38 Valores médios de alguns parâmetros para o cálculo do fator de intensidade de tensão das placas obtidas por moldação manual.....	67
Tabela 39 Valores médios para a resistência à fratura, das placas obtidas por autoclave.....	68
Tabela 40 Valores médios para a resistência à fratura, das placas obtidas por moldação manual.....	68
Tabela 41 Valores médios de alguns parâmetros para a caracterização à fratura em modo I.....	70
Tabela 42 Valores médios da tensão máxima, módulo de Young e deformação máxima para a solicitação de flexão e tração.....	74
Tabela 43 Valores médios do fator de intensidade de tensão crítico e taxa de liberação de energia crítica.....	74

Índice de gráficos

Gráfico 1 Ensaio de flexão da placa JRAPP0101.....	49
Gráfico 2 Ensaio de flexão da placa JRAP0105.....	49
Gráfico 3 Ensaio de flexão da placa JRMP0105.....	50
Gráfico 4 Ensaio de flexão da placa JB45APP0601.....	50
Gráfico 5 Ensaio de flexão da placa JB45AP0606.....	51
Gráfico 6 Ensaio de flexão da placa JB45MP0606.....	51
Gráfico 7 Ensaio de flexão da placa JU0APP0601.....	52
Gráfico 8 Ensaio de flexão da placa JU0AP0605.....	52
Gráfico 9 Ensaio de flexão da placa JU0MP0605.....	53
Gráfico 10 Representação tensão deformação da placa JRAPP0102.....	58
Gráfico 11 Representação tensão deformação da placa JRAP0102.....	59
Gráfico 12 Representação tensão deformação da placa JB45APP0602.....	59
Gráfico 13 Representação tensão deformação da placa JB45AP0605.....	60
Gráfico 14 Representação tensão deformação da placa JB45MP0606.....	60
Gráfico 15 Representação tensão deformação da placa JU0APP0602.....	61
Gráfico 16 Representação tensão deformação da placa JU0AP0606.....	61
Gráfico 17 Representação tensão deformação da placa JU0MP0606.....	62
Gráfico 18 Representação da carga deslocamento de um ensaio CT.....	66

SÍMBOLOGIA

ASTM	American Society for Testing and Materials
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica
FCT	Fundação para Ciência e Tecnologia
ρ	Densidade do material
$\varepsilon_{\text{máx}}$	Deformação máxima
ν	Coefficiente de Poisson
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima
E	Módulo de Young
CT	Compact tension
SENB	Single edge notch bend
G_{Ic}	Taxa crítica de libertação de energia de fratura em modo I
a	Comprimento da fenda inicial
B	Espessura dos provetes
$P_{\text{máx}}$	Solicitação máxima aplicada até ocorrer a cedência
RTM	Reaction Transfer Moulding
SMC	Sheet molding compound
SRIM	Structural reaction injection moulding
BMC	Bulk molding compounds
TLC	Teoria clássica dos laminados

1 Introdução

Os materiais compósitos são a aglomeração de dois ou mais materiais distintos onde se obtém melhores propriedades mecânicas do que as dos constituintes base. Os compósitos de matriz polimérica são cada vez mais usados devido ao seu baixo peso específico, elevada rigidez e resistência mecânica. Estes materiais estão representados em diferentes áreas nomeadamente, áreas de elevada exigência e com visibilidade tecnológica, áreas da aeronáutica, espacial, militar, indústria automóvel, artigos desportivos e pretende substituir os materiais tradicionais de engenharia civil.

O presente trabalho está integrado no projeto de Investigação e Desenvolvimento financiado pela FCT PTDC/EME-PME/111698/2009 “Caracterização Experimental e Numérica de Materiais Compósitos de Fibras Naturais Longas”.

1.1 Objetivos

Tal como foi referido acima este trabalho é a continuação de um projeto da FCT, que teve início em 2009, visa o estudo experimental de um novo material compósito, utilizando fibra de juta como elemento estrutural, de forma a compreender a sua influência na absorção de energia e resistência ao dano de um material compósito. Pretende-se deste modo fazer uma caracterização à flexão e tração para fazer-se uma caracterização à mecânica da fratura em modo I, em termos experimentais.

1.2 Motivação

A motivação para a utilização de materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais, esta associada à crescente procura de materiais que sejam abundantes e em constante renovação e que sejam recicláveis. As fibras naturais têm vindo a crescer gradualmente na indústria, apesar das suas propriedades mecânicas não estarem ao nível das fibras sintéticas (nomeadamente fibra de vidro e a de carbono). Como principais vantagens os compósitos de fibras vegetais em relação aos compósitos de fibras sintéticas são a biodegradabilidade, baixa densidade e o baixo custos, contudo estas fibras apresentam características mecânicas inferiores e sua elevada capacidade para absorção de humidade.

1.3 Resumo de capítulos

A presente dissertação apresenta-se estruturada da seguinte forma:

- capítulo 2: uma breve revisão bibliográfica acerca dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais e dar a conhecer a fibra de juta, assim como os processos usados para a produção de compósitos laminados;
- capítulo 3: propriedades mecânicas de um material compósito;
- capítulo 4: uma breve revisão da mecânica da fratura e os ensaios para a determinação de tenacidade em modo I, com recurso há norma usada.
- capítulo 5: descrição de todo o procedimento experimental que envolve a produção dos provetes;
- capítulo 6: Apresentação e discussão dos resultados obtidos nos diferentes ensaios mecânicos realizados no presente trabalho.
- Capítulo 7: apresentação das conclusões deste trabalho;
- Capítulo 8: enumeração de algumas sugestões para a continuidade deste trabalho

2 Estado da arte

Um material compósito resulta de uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem quanto à sua forma e composição química e insolúveis uns nos outros, onde seja possível observar os diferentes constituintes a olho nu [1].

Os materiais compósitos são classificados pelo material que forma a matriz, que é a fase contínua, e esta envolve uma outra fase, designada por reforço ou fase dispersa [2]. Na Figura 1, está representada a fase contínua, a fase reforço e a interface.

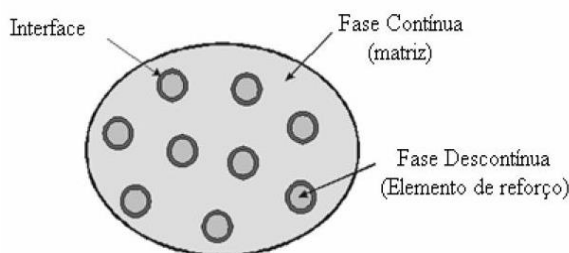


Figura 1 Fases de um material compósito.[3]

A seleção entre as várias opções de materiais, tanto da matriz como do reforço, é condicionada por inúmeros fatores, tais como, desempenho, custo, condições de processamento e disponibilidade [4].

2.1 Matriz

Como está representado na Figura 2 a matriz pode ser uma matriz polimérica, uma matriz metálica ou uma matriz cerâmica. A fase matriz confere estrutura ao material compósito preenchendo os espaços vazios que ficam no reforço, mantendo-o na sua posição. A matriz protege as fibras do meio envolvente, protege-as do dano durante o manuseamento, distribui o carregamento pelas fibras e redistribui o carregamento pelas fibras resistentes em caso de rutura [2, 5]. Neste trabalho vai-se aprofundar os materiais compósitos de matriz polimérica, uma vez, que esta foi a usada no âmbito deste trabalho.

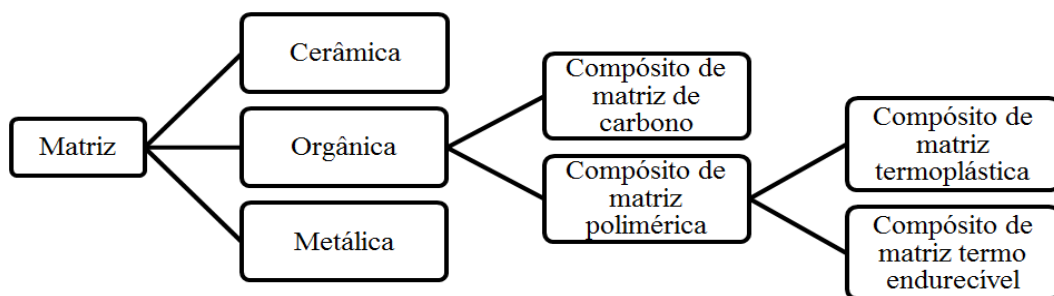


Figura 2 Classificação dos materiais compósitos quanto à matriz [6].

2.1.1 Matriz polimérica

As matrizes poliméricas são constituídas por moléculas de grandes dimensões (macromoléculas), estas na sua cadeia central são constituídas por unidades repetitivas designados por monómeros, unidos por ligações fortes, porém, as ligações entre as moléculas são mais fracas. Estas matrizes dividem-se em duas categorias principais que são os termoplásticos e os termoendurecíveis. A produção comercial de grânulos reforçados que ocorreu a partir da década de 60 facilitou o rápido crescimento dos compósitos de matriz termoplástica, estimando-se que representem atualmente cerca de 35% do mercado mundial de materiais compósitos [4].

2.1.1.1 Matrizes termoplásticas

No grupo das matrizes poliméricas termoplásticas estão os designados plásticos técnicos, que são constituídos por macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si. As macromoléculas são mantidas nas suas posições devido a ligações secundárias (forças intermoleculares), tais como as forças de Van der Waals e ligações de hidrogénio. Uma vez o termoplástico aquecido, as ligações entre as macromoléculas são quebradas temporariamente. Permitindo deste modo a mobilidade molecular, o que vai permitir a reconformação, ou seja vão tomar posições diferentes. Com um arrefecimento posterior, as moléculas vão ficar nessa posição (que tinham tomado quando aquecido), restabelecendo deste modo as ligações químicas acima referidas. Estes materiais salientam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor higroscopicidade quando comparados com os polímeros termoendurecíveis. São facilmente processados por injeção ou por termoformação e podem ser reciclados. O crescimento da utilização, dos compósitos de matriz polimérica termoplástica é condicionado pela maior dificuldade em impregnar completamente os reforços [4].

2.1.1.2 Matrizes termoendurecíveis

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais rígidas. Estas matrizes não podem ser reprocessadas, ao invés do que acontece com os termoplásticos. Uma vez aquecidos os termoendurecíveis, estes assumem uma forma permanente [4].

Os termoendurecíveis também podem ser chamados de resinas termoendurecíveis, uma vez que são frequentemente fornecidos para processamento sob a forma de uma mistura de dois ou de três componentes, que são a resina, o acelerador e o catalisador. Quando estes componentes são misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional, num processo que se designa por cura. A principal vantagem sobre os termoplásticos é a facilidade de impregnação do reforço, uma vez que a viscosidade, antes da cura, é muito mais baixa que a dos termoplásticos. Uma característica fundamental destas resinas é a temperatura limite de funcionamento, especialmente as temperaturas ditas de transição e a temperatura de deflexão sob carga. As resinas termoendurecíveis mais utilizadas no fabrico de compósitos para aplicação não – estruturais e semi – estruturais são os

poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas. Em compostos avançados de alta resistência, os epóxidos, as bismaleimida e as poliimidas são as mais comuns [4]. Em baixo, apresentou-se algumas destas resinas, nomeadamente, os poliésteres insaturados e a resina epóxido, na Tabela 1 podemos ver algumas das características das resinas referidas acima. Salientamos estas duas resinas, uma vez que foram as usadas neste trabalho para a elaboração das placas.

Poliésteres insaturados

As resinas de poliéster classificam-se em duas classes, dignamente por resinas saturadas e insaturadas. No grupo das saturadas estão os poliésteres comerciais sob a forma de filme ou fibras, as resinas termoplásticas [4].

As resinas de poliéster insaturado são as de uso mais frequentes, devido ao baixo custo, baixa viscosidade, à sua facilidade de processamento e bom compromisso entre propriedades mecânicas, elétricas e químicas, tem um tempo de cura rápido, a cura tem início imediatamente após adição de catalisadores, habitualmente são peróxidos orgânicos e aceleradores especiais, por exemplo à base de cobalto. O processo de cura desenvolve-se em duas fases, a primeira a resina líquida transforma-se num material gelatinoso, etapa designada por ‘ponto de gel’ e a segunda fase conduz ao endurecimento final através de um processo exotérmico. A velocidade de reação depende de vários fatores, nomeadamente reatividade da resina, teor de acelerador, teor de catalisador e as condições ambientais [4]. O principal inconveniente destas resinas é a elevada retração volumétrica durante o seu processamento, o que pode criar tensões residuais internas [1].

Resinas de epóxido

As resinas de epóxido apresentam grande variedade de formulações químicas, a maior parte baseados no diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA). A cura destas resinas passa pela adição de um agente endurecedor apropriado, como aminas alifáticas, aromáticas ou algumas poliamidas. Como vantagens temos elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química (sobretudo em meios alcalinos), boas propriedades de adesão à fibra, durante o processo de cura não há libertação de voláteis e tem baixa retração, grande estabilidade dimensional em resultados de funcionamento tipicamente entre 100 a 220°C, o baixo peso molecular das resinas epoxídicas não curadas no estado líquido, confere-lhes uma mobilidade molecular elevada durante o processamento. Esta propriedade permite que a resina epoxídica líquida, molhe mais rapidamente e totalmente as superfícies. Esta ação de molhagem é importante nas resinas epoxídicas utilizadas em materiais reforçados e em adesivos. Como desvantagens temos um processo dispendioso, o processamento cuidado para garantir resistência à humidade e o elevado tempo de cura. Estes fatores, geralmente, limitam a sua aplicação ao fabrico de sistemas compósitos com reforços já pré-impregnados de fibras de elevado módulo de elasticidade [1, 4].

Na Tabela 1, podemos observar algumas características mecânicas das resinas termoendurecíveis, sendo que o ρ representa a densidade volúmica, E coeficiente de Young, σ tensão e ε elongação máxima.

Tabela 1 Propriedades mecânicas da resina de poliéster e epóxico [7].

Termoendurecíveis	ρ (kg/ m ³)	E (GPa)	σ (MPa)	ε (%)
Poliéster	1100-1230	3,1-4,6	50-75	1,0-6,5
Epóxico	1100-1200	2,6-3,8	60-85	1,5-8,0

2.2 Reforço

O reforço é o elemento responsável pelo bom desempenho do material compósito, uma vez que, é este que suporta a quase totalidade das cargas aplicadas no material compósito. De uma forma geral, a fase dispersa dos compósitos deve ser de elevada resistência mecânica e de elevada rigidez, para além disso, deve elevar a resistência térmica e condutividade. Para o reforço representar uma vantagem para o compósito, este deve ser mais resistente e mais rígido que a matriz. Deste modo a boa interação entre matriz e reforço pode ser garantida pela criação de uma interface entre ambos que possa adequar a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz. Para tal é essencial que a ductilidade da matriz seja mínima ou mesmo nula para que o compósito apresente um comportamento relevante [2, 4].

As fibras podem contudo apresentar um desempenho diminuído devido a vários fatores, como o comprimento. A performance dos compósitos reforçados com fibras é avaliada pelo comprimento, forma, orientação, e composição das fibras bem como pelas propriedades mecânicas da matriz. O arranjo das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e a sua distribuição influenciam significativamente a resistência e outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras [2].

2.2.1 Classificação das fibras quanto à orientação

Algumas das principais configurações possíveis em relação à orientação das fibras:

- Um alinhamento totalmente aleatório;
- Um alinhamento unidirecional;
- Um alinhamento bidirecional.

Normalmente, as fibras contínuas estão alinhadas enquanto as fibras descontínuas podem estar desalinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas [2].

2.2.2 Classificação quanto à forma do reforço

A fase dispersa ou reforço existe em diversas formas sendo a classificação mais geral feita em três categorias:

- Compósitos de partículas: partículas de vários tamanhos e forma que se encontram dispersadas pela matriz, exemplos betão, asfalto. Devido ao carácter aleatório da dispersão, estes compósitos podem ser considerados quase-isotrópicos,

- Compósitos de fibras descontínuas (*whiskers*): contêm fibras curtas como fase de reforço. Podem estar orientadas numa mesma direção ou orientadas aleatoriamente. No primeiro caso o compósito pode ser considerado ortotrópico e no segundo, quase-isotrópico. São exemplo destes, as fibras de carbono, kevlar, vidro, juta em matrizes poliméricas);
- Compósitos de fibras contínuas (laminares e sandwich): as fibras podem ser todas paralelas (fibras unidirecionais) ou formarem ângulos retos entre si (fibras cruzadas) ou orientadas em várias direções (fibras multi-direcionais) [3].

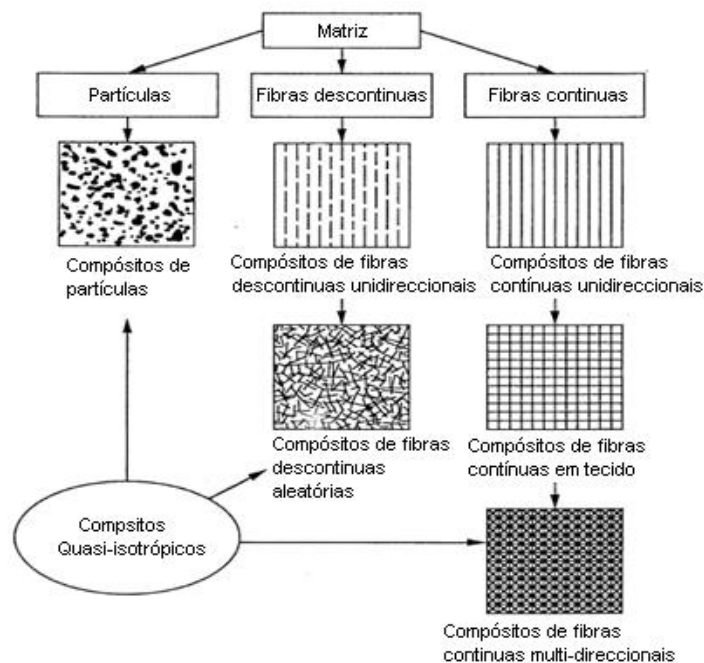


Figura 3 Classificação de matérias compósitos segundo o reforço [8].

Como podemos ver pela Figura 3, as fibras longas são alinhadas, enquanto as fibras curtas são alinhadas ou orientadas aleatoriamente. A resistência mecânica depende da forma das fibras, como atrás já foi referido. Como a matriz transfere a carga às fibras, estas tem de ter uma boa adesão na interface fibra/matriz [9].

Quando nós aumentamos a quantidade de fibra, a distribuição da tensão aplicada no compósito vai ter uma forma mais uniforme o que vai fazer com que, (geralmente) o módulo de resistência à tração do compósito aumente, em detrimento da deformação na rotura. Contudo existe um ponto onde a resistência à tração decresce devido ao aumento da quantidade de resina ser insuficiente para manter as fibras adequadamente juntas, os compósitos com fibras alinhadas na direção de solicitação apresentam propriedades de resistência e módulo de elasticidade, que aumentam com o comprimento e teor de fibras. No caso, da solicitação ser na direção transversal o compósito apresenta uma redução das propriedades, com a resistência à tração a decrescer e o módulo de elasticidade à tração a aumentar, à medida que o conteúdo e o comprimento das fibras aumentam. A rutura ocorre na direção normal quando as fibras estão orientadas longitudinalmente, quando as fibras estão

orientadas transversalmente à solicitação, a resistência oferecida pela fibra à propagação de fissuras é inferior à oferecida pela matriz.[9].

A adesão matriz-fibra é muito importante no fabrico do compósito, sendo que a natureza do tratamento das fibras, a adição de promotores de adesão à resina, o grau de ligações cruzadas de matrizes termoendurecíveis, a temperatura de transição vítrea, T_g de matrizes termoplásticas em relação à temperatura ambiente e o grau de retração da matriz sobre as fibras durante o fabrico do compósito, são parâmetros que condicionam a adesão entre fibra e matriz [9].

O reforço pode estar representado em diferentes formas, nomeadamente [4]:

- **Roving**: cordão de filamentos enrolados helicoidalmente em bobines,
- **Mantas**: distribuição aleatória das fibras (são agregadas com um ligante especial em emulsão de pó, onde é conferida estabilidade e deve ser solúvel na impregnação (no presente trabalho usou-se manta de fibra de juta, como reforço),
- **Tecidos 2D ou 3D** são produzidos por ligação entre um feixe de fibras longas, são usados quando é requerido elevadas propriedades mecânicas. A diferença entre o modelo 2D e 3D é o facto de o modelo 3D possuir fibras orientadas na direção da espessura (melhor resistência interlaminar), contudo, desta forma para se garantir uma boa impregnação é necessário limitar o teor de fibra orientadas no plano, o que diminui as propriedades mecânicas em relação ao 2D. Os tecidos são caracterizados pela orientação das fibras, pelos diferentes métodos usados na sua confeção e classificados pela massa por unidade de área, sendo assim estes dividem-se:
 - **tecidos entrelaçados** (*woven fabrics*): produzidos pelo entrelaçamento de cordões de fibras segundo direções perpendiculares, apresentando diferentes padrões, nomeadamente o “*plane weave*” onde cada cordão de fibra está orientada a 0° passa alternadamente por baixo e por cima de cada cordão de fibra orientada a 90° , (esta é a forma do reforço de juta usado neste trabalho), depois temos os tecidos “*twill weave*” onde uma ou duas das fibras a 0° é tecida por baixo e por cima de uma ou duas fibras a 90° de uma forma regular ou repetida, e por fim temos os *satín weave* que são parecidos com os *twill weave* modificados de forma a provocar poucas intersecções entre as fibras a 0° e as fibras a 90° .

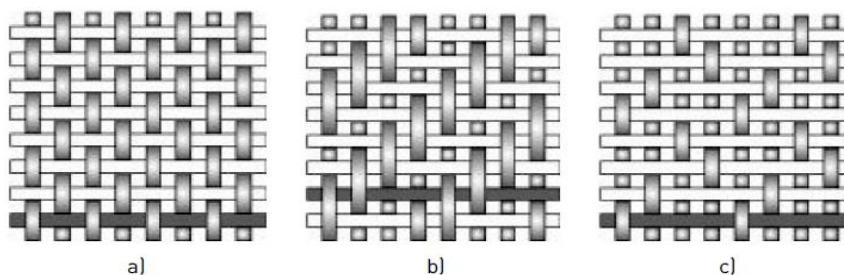


Figura 4 Diferentes tecidos, a) *plane weave*, b) *twill weave* e c) *satín weave* [4].

- tecidos quase unidirecionais têm elevada predominância de fibras orientadas a 0°.
- tecidos híbridos, combinação de diferentes tipos de fibra, de forma a juntar as melhores características de cada fibra
- malha é constituída por sucessivas camadas de fibras alinhadas, estas são cozidas em conjunto, dá uma boa conformabilidade e boa resistência interlaminar.
- tecidos 3D, são obtidos por processos especiais de tecelagem que ligam as diferentes camadas em diferentes orientações
- entrelaçados
- pré – formas,

Os reforços dividem-se normalmente em dois grupos:

- fibras sintéticas: produzidas pelo homem por exemplo as fibras de vidro, as fibras de carbono, as fibras de aramídicas e as fibras de boro,
- fibras naturais que podem ser de: origem vegetal, minerais (provém das rochas com estrutura fibrosa e são constituídas geralmente por silicatos, um exemplo é o amianto) e animal (podem provir da secreção glandular de alguns insetos, por exemplo a seda ou então de bolbos pilosos de alguns animais, por exemplo a lã).

As fibras naturais são usadas essencialmente devido à sua baixa densidade bom isolamento térmico, boas propriedades térmicas, boas propriedades metálicas, baixo preço, durabilidade, sustentabilidade e biodegradabilidade.

A utilização de fibras vegetais como reforço foi escolhida como objeto de estudo neste trabalho, sendo que vamos dar maior destaque. Na Figura 5 podemos observar as diferentes classificações das fibras naturais.

2.2.3 Fibras vegetais

As fibras de origem vegetal são estruturas alongadas de seção transversal circular, podem ser classificadas de acordo com a sua origem [9]:

- fibras do caule/floema: estão associadas ao tecido vascular de floema e são constituídas por uma única faixa de fibras, com várias camadas de espessura, localizadas na região periférica externa do cilindro central das plantas dicotiledóneas.
- fibras de folha: estão associadas ao tecido vascular, são extraídas de plantas monocotiledóneas.
- fibras de fruto: são provenientes das sementes e frutos.

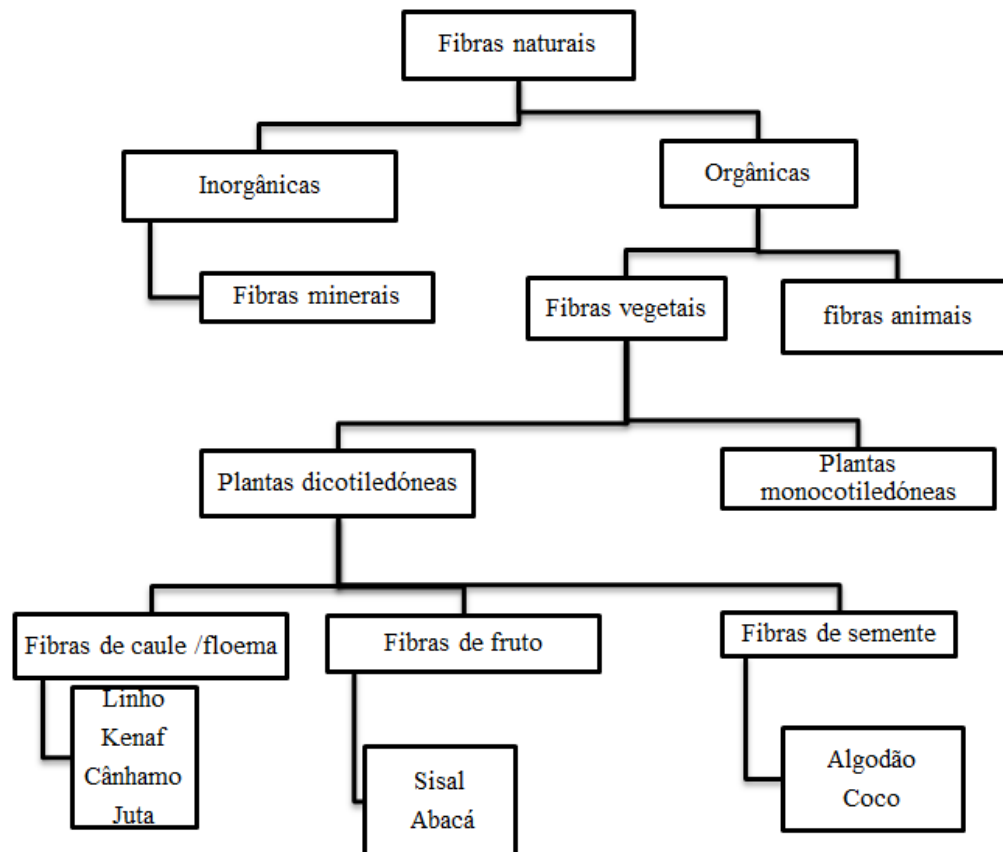


Figura 5 Classificação das fibras naturais[10].

As fibras vegetais têm como vantagem em relação as fibras sintéticas [9, 11]:

- biodegradabilidade;
- abundância, disponível em grandes variedades e quantidades;
- recicláveis;
- baixo custo;
- baixo peso específico;
- elevada relação comprimento / diâmetro;
- natureza não abrasiva, não danificam nem são prejudiciais para a saúde;
- possibilidade de maior fração volúmica no compósito, devido à sua natureza não abrasiva, permitindo obter compósitos com elevadas propriedades específicas devido à sua baixa densidade.

Contudo apresenta várias desvantagens [9, 11]:

- temperatura de processamento limitada: a componente celulósica das fibras degrada-se rapidamente e irreversivelmente, a temperaturas relativamente baixas 200-300°C;
- elevada capacidade para absorção de humidade, devido à sua natureza hidrófila o que dá origem a uma má estabilidade dimensional (dilatação das fibras), as propriedades mecânicas são inferiores quando comparadas com as outras fibras;
- incompatibilidade com alguns polímeros, devido à sua natureza hidrófila torna-se incompatível com polímeros de natureza hidrófoba;
- qualidade variável depende de influências imprevisíveis como as condições climáticas durante o cultivo.

Na Tabela 2 podemos observar algumas propriedades das fibras de origem vegetal em comparação com a fibra de vidro. As fibras vegetais apresentam menor densidade, sendo esta a maior vantagem, o que faz com que sejam cada vez mais usadas. Para além disso as fibras naturais têm um preço mais baixo do que as sintéticas. A fibra de vidro apresenta um valor muito mais elevado na resistência à tração, módulo de Young, sendo que as fibras vegetais apresentam baixa densidade.

Tabela 2 Comparação de algumas propriedades de fibras naturais com a fibra de vidro [10].

Propriedades	Vidro	Linho	Cânhamo	Juta	Rami	Sisal	Algodão
Densidade (ρ) - [g/cm ³]	2,55	1,4	1,48	1,46	1,5	1,33	1,51
Resistência à tração (σ_{μ}) - [MPa]	2400	800-1500	550-900	400- 800	500	600- 700	400
Módulo de Young (E) - [GPa]	73	60-80	70	10-30	44	38	12
Módulo de Young específico- (E/ ρ)	29	26-46	47	7-21	29	29	8
Alongamento até à rotura [%]	3	1,2-1,6	1,6	1,8	2	2-3	3-10
Absorção de humidade [%]	-	7	8	12	12-17	11	8-25

Existem diferentes métodos mecânicos e químicos, com o intuito de melhorar as propriedades químicas das fibras vegetais promovendo uma boa adesão à matriz do compósito.

No caso dos métodos mecânicos encontram-se o de descarga elétrica, tratamento corona e tratamento plasma frio, estas técnicas são usadas para a ativação da oxidação de superfície das fibras celulósicas mudando a sua energia de superfície. Este método é de custo elevado. Em alternativa existem os tratamentos químicos: tratamentos por silano, por hidróxido de sódio (mercerização ou alcalinização), tratamentos enzimáticos e acetilizados [12, 13].

2.2.3.1 Fibra de juta

De entre todas as fibras vegetais vamos dar especial ênfase à fibra de juta, já que foi a usada na extensão deste trabalho. Segue em baixo uma breve introdução sobre estas fibras, a sua constituição e produção da mesma.

A fibra de juta é 100% biodegradável, um hectare de juta consome cerca de 15 toneladas de dióxido de carbono e liberta cerca de 11 toneladas de oxigênio, a queima da juta não liberta gases tóxicos [14]. Na Figura 6, podemos observar a constituição de um caule de uma planta de juta, a fibra é uniforme na sua constituição longitudinal e na secção transversal é não – uniforme [10].

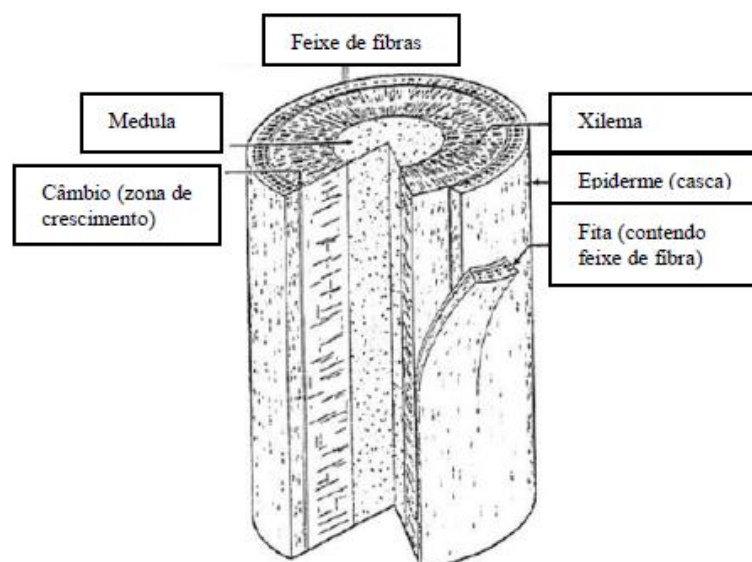


Figura 6 Caule de uma planta juta [10].

A flutuação da produção da juta é influenciada por condições climáticas e preços. A produção anual nas últimas décadas varia entre 2,5-3,2 milhões de toneladas [14]. A juta é uma das fibras de origem vegetal mais produzida, como podemos observar pela Tabela 3.

Tabela 3 Fibras de origem vegetal mais comercializadas (2010) [15].

Fibra	Produção no mundo (10^3 ton)
Bambu	30000
Juta	2300
Kenaf	970
Linho	830
Sisal	378
Cânhamo	214
Coco	100
Rami	100
Abacá	70
Cana-de-açúcar	75.000
Erva	700

As fibras provenientes do caule, como é o caso da juta, são extraídas de plantas dicotiledóneas, como foi referido na Figura 5, esta, pertence ao género *Corchorus*. Apesar de haver mais de 40 espécies, só são cultivadas duas para venda comercial, a juta branca (*Corchorus capsularis*) e a tossa (*Corchorus. olitorius*), sendo que a tossa é mais suave, sedosa e mais forte do que a primeira. A juta tossa é mais vulgar no clima do Delta do Ganges

[10]. Segundo os dados da Tabela 4, referentes ao ano de 2011 os maiores produtores de juta são a Índia e o Bangladesh.

Tabela 4 Maiores produtores de juta do ano 2011 [16].

Os 10 maiores produtores de juta-2011	
País	Produção (toneladas)
Índia	1924326
Bangladesh	1523315
China	43500
Uzbequistão	18930
Nepal	14418
Vietnam	8304
Burma	2508
Zimbábue	2298
Tailândia	2184
Egipto	2100
Mundo	3583235

A fibra de juta, é uma fibra lignocelulosica, tem uma estrutura multicelular é composta por microfibrilas (organelos tubulares dispostos em feixes longitudinais). Cada camada contém celulose, hemicelulose e lignina entre outros, com quantidades variáveis como podemos ver na Tabela 5, estas quantidades dependem da zona de origem e como foi extraída, tratamentos químicos, grau de maturidade da planta, condições do solo e fertilizantes aplicados, humidade, entre outro. As microfibrilas têm diâmetro de cerca 10-30nm e são responsáveis por dar a resistência mecânica às fibras. Na Figura 7 está representada a constituição de uma microfibrila [17].

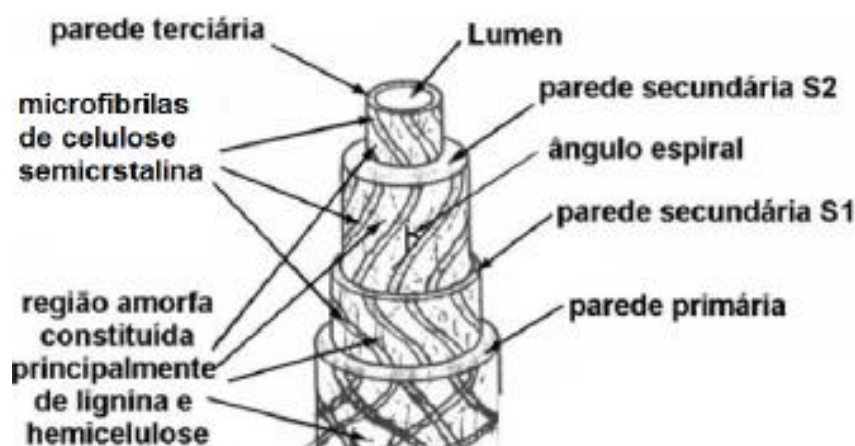


Figura 7 Representação esquemática de uma microfibrila [18].

Tabela 5 Composição química da fibra de juta [17].

Constituintes	%
Celulose	60-70
Hemicelulose	22-24
Lignina	12-14
Outros	1-2

A microfibrila é constituída por uma parede primária, que é a mais exterior composta por finas microfibrilas de celulose embebidas numa matriz de proteínas, hemicelulose e pectina, e a secundária (S), formada por 3 camadas (S1,S2,S3), é menos hidratada e mais dura do que a parede primária, possui quantidades inferiores de hemicelulose e pectina e não contém proteínas, a parede secundária mostra uma orientação aproximadamente paralela das microfibrilas de celulose e encontram-se inclinadas em relação ao eixo longitudinal da fibra. O ângulo de orientação das microfibrilas varia nas diferentes camadas e a sua deposição dá-se por aposição [9, 17].

A camada S2 é a de maior espessura e a de maior teor em celulose, é a responsável pelas propriedades da fibra, nomeadamente deformação à rotura, módulo de elasticidade resistência à tração. As microfibrilas de celulose estão dispostas quase paralelamente ao eixo da fibra [9, 17].

As fibras individuais estão ligadas entre si por uma região rica em lignina, que se designa por lamela média. A celulose atinge a sua máxima concentração na camada S2 (cerca 50%) e lignina é a mais concentrada na lamela média (cerca 90%) [17].

A celulose é um polímero hidrofílico que é constituído por seis grupos de hidroxila, estes grupos fazem ligações do tipo ponte de hidrogénio intra e intermoleculares. Nas ligações intramoleculares, as hidroxilas da própria molécula ligam-se entre si e nas ligações intermoleculares ligam-se com outras moléculas de celulose ou moléculas que estão presentes no ar, ora sendo assim, as fibras vegetais apresentam uma grande afinidade com a humidade (hidrofilia) e pouca afinidade com matrizes poliméricas hidrofóbicas. A lignina é um polímero natural, com um elevado grau de polimerização, esta é a responsável por dar rigidez às plantas. A hemicelulose é um polissacarídeo é ligado por pontes de hidrogênio com as microfibrilas de celulose formando uma rede [19].

Os parâmetros quantidade de celulose e o ângulo da espiral são fundamentais para a caracterização das propriedades mecânicas, de uma forma geral a resistência à tração aumenta com o aumento da celulose e com a diminuição do ângulo da microfibrilas relativamente ao eixo das fibras, tal como podemos ver pela Figura 8, onde está representada a curva tensão-deformação de uma planta lignocelulosica[9, 20].

A rigidez depende também do diâmetro e comprimento da fibra, ou seja com, diâmetro mais pequeno consegue-se uma maior superfície de contacto específico entre as fibras e a matriz [20].

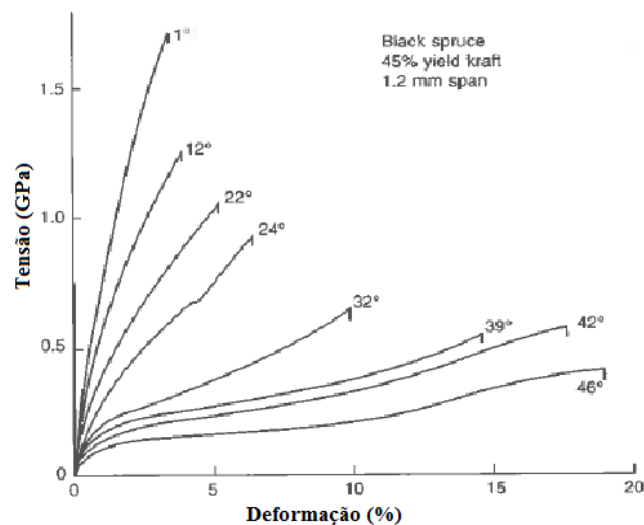


Figura 8 Curva tensão-deformação de uma planta lignocelulósica [21].

A época da sementeira varia com a natureza do clima fazendo-se normalmente entre Março e Abril, sendo depois colhida quando a altura atinge aproximadamente 3 metros. As plantas florescem durante 4 a 5 meses, após este tempo inicia-se a colheita, cortando-se as plantas, em seguida estas são secas ao sol, são limpas as folhas, são postas em feixes dentro de água corrente ou parada. A alta temperatura sentida nestas regiões favorece a fermentação e desta forma consegue-se o curtimento (maceração) em 8 a 10 dias. No processo de maceração é extraído a fibra útil que está contida entre a casca e a parte interna do caule. Tira-se assim facilmente a casca da planta e elimina-se da fibra a parte lenhosa do caule. Enxagua-se e empacota-se. As melhores qualidades da juta distinguem-se pelo seu comprimento, pela resistência das fibras e pela cor brilhante do caule. As qualidades inferiores distinguem-se pela cor dos caules que são mais escuros, pelos menores comprimento de fibra, pela cor amarelo-acinzentado e pela menor resistência [22].

2.3 Pré-impregnados

Os pré-impregnados constituem uma mistura de fibra com uma resina, para posterior consolidação. Os pré-impregnados são semi - produtos de elevado custo para aplicações que requerem uma elevada exigência. Existem pré-impregnados de base termoendurecíveis e pré-impregnados de base termoplástica. Nos pré-impregnados de base termoendurecíveis, a resina mais usada é o epóxico, sendo adicionado um inibidor que impede a cura antes do processamento, desde que armazenados a temperaturas baixas. Como vantagens apresenta [4]:

- maneabilidade;
- auto - adesão de camadas no empilhamento;
- facilidade de posicionamento;
- boa conformabilidade a curvaturas do molde.

Como desvantagem é a sua validade limitada, contrariamente ao que acontece com os pré-impregnados de base termoplástica, que possuem tempo de validade ilimitada à temperatura

ambiente, são processados a temperatura de fusão da resina cuja elevada viscosidade dificulta a impregnação e consolidação. São também rígidos e mais difíceis de manter em posição no empilhamento. Como não possuem capacidade de auto - adesão de camadas, o processamento posterior exige pré - aquecimento. As vantagens do uso deste pré-impregnado é a sua capacidade de reciclagem, o reduzido tempo de processamento, elevada tenacidade e resistência ao impacto [4].

Na Figura 9 podemos observar um pré- impregnado onde a fibra impregnada com resina é protegida por um filme protetor na superfície inferior e superior, desta forma pode ser guardada sob a forma de um rolo.

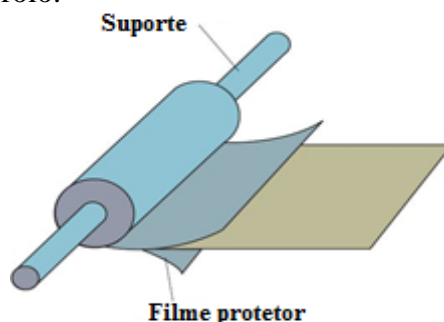


Figura 9 Forma de um pré-impregnado [23].

2.3.1 Processo de pré-impregnação

Os pré-impregnados podem ser feitos de forma automática ou manual. Neste trabalho a produção dos pré-impregnados foi realizada manualmente. Os pré-impregnado produzidos de forma automática têm como objetivo aumentar a produção o que leva a uma redução de custos. No processo de fusão a quente podem usar-se fibras unidirecionais ou tecidos.

Na Figura 10 está representado um esquema do método automático para se produzir compósitos laminados. A produção das camadas é feita através da deposição de uma película de suporte entre cada camada de fibra/matriz para evitar que as camadas se colem umas às outras, à resina é adicionado um solvente para reduzir a viscosidade e facilitar a molhagem e a impregnação do reforço, a matriz é impregnada através de rolos, depois estes laminados passam por um forno (onde é iniciada a reação de cura da resina), finalmente são enrolados e armazenados no congelador para abrandar a reação de cura [23].

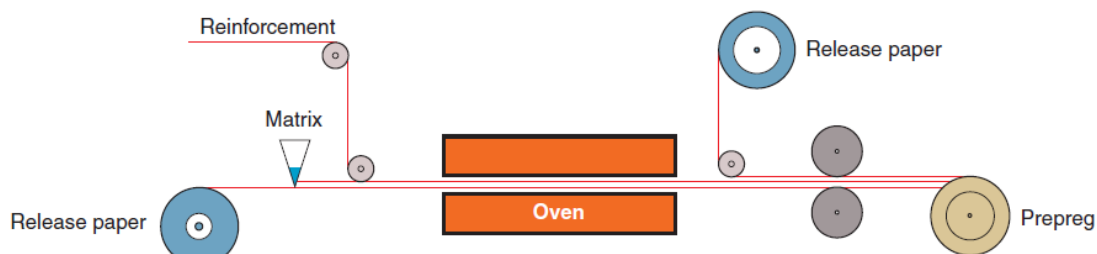


Figura 10 Esquema de processo de pré-impregnação automático [23].

2.4 Métodos de fabrico de materiais compósitos

Os diferentes processos para a obtenção de um compósito podem ser generalizados em dois tipos: processo em molde aberto ou processo em molde fechado. No caso dos moldes abertos, apenas uma das superfícies tem bom acabamento, limitação que é compensada pela possibilidade de realização de componentes de grandes dimensões e de geometria complexa, pois a pressão exercida é reduzida ou inexistente. Os processos de molde fechados apresentam excelentes acabamentos nas duas superfícies e ótima reprodutibilidade, outra vantagem é a menor inibição de produtos voláteis, nocivos para a saúde [4].

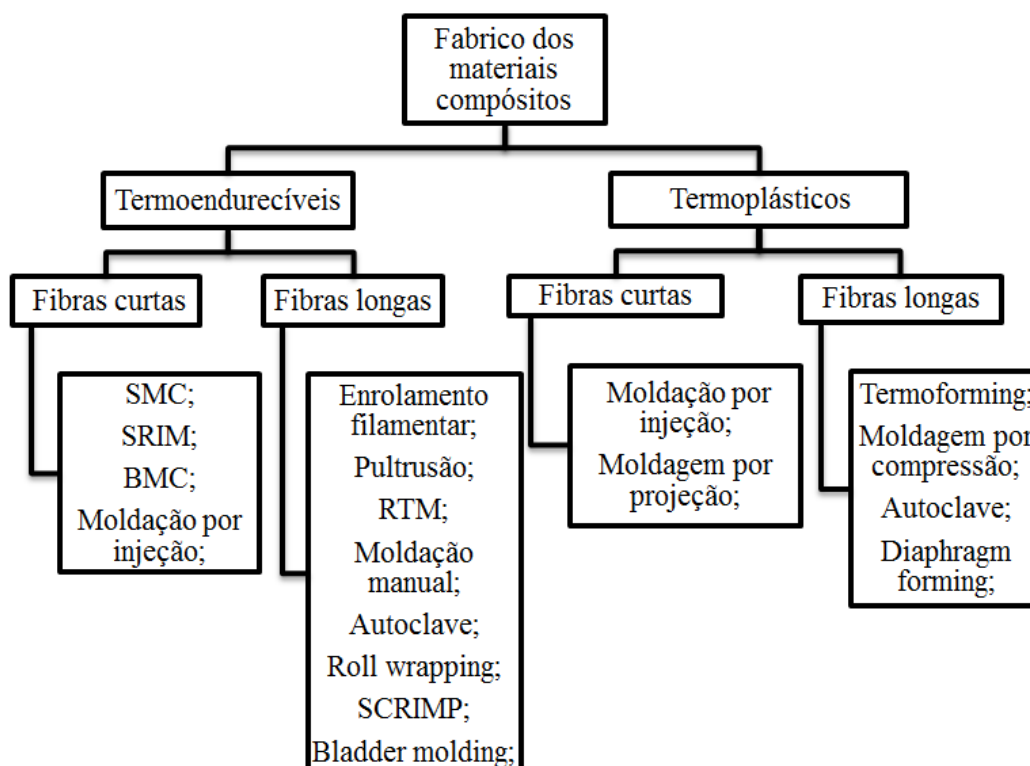


Figura 11 Classificação dos processos de fabrico de um compósito de acordo com a resina usada [24].

No presente trabalho, foram feitas placas de compósitos por moldação manual e moldação em autoclave. Na Figura 11, podemos observar os diferentes processos de moldação, que são usados com as resinas termoplásticas e termoendurecíveis.

2.4.1 Moldação manual

A moldação manual está inserida na moldação por contacto, é o método mais económico e mais comum, trata-se de um método manual, é feito em molde aberto o empilhamento e a impregnação das sucessivas camadas de reforço. Numa fase inicial é revestido o molde com uma resina poliéster, o “gel-coat”, cuja função é de garantir um bom acabamento superficial. Seguidamente coloca-se de forma manual o reforço (normalmente um tecido ou manta) e coloca-se a resina. Com a ajuda do pincel e de rolos é possível molhar completamente o reforço. Neste processo é aplicado um desmoldante sobre o molde [4].

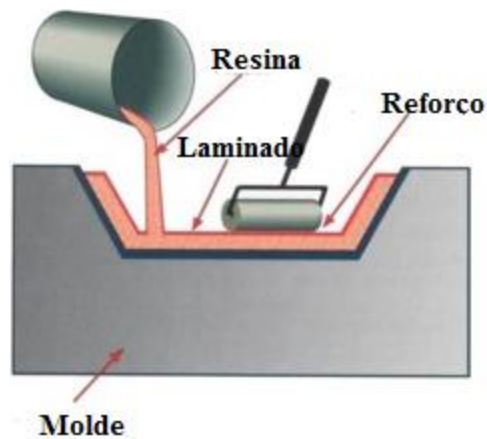


Figura 12 Processo de moldagem manual[25].

As principais vantagens deste método são [4]:

- simplicidade;
- reduzido investimento inicial;
- poucas restrições de geometria das peças a realizar.

As principais desvantagens são [4]:

- custos associados à mão-de-obra;
- qualidade das peças depende do operador;
- libertação de voláteis o que exige um lugar ventilado;
- bom acabamento superficial numa das faces;
- teor da fibra heterogéneo;
- necessidade de rebarbagem e acabamento da peça.

2.4.2 Moldagem em autoclave

Este processo de moldagem é adequado para pequenas series de fabrico, onde são exigidas peças com elevado desempenho mecânico e qualidade, como é o caso da indústria aeronáutica, desporto automóvel. Este processo consiste na consolidação de um componente preformado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo, estes estágios dependem do material a moldar, o que implicam uma subida gradual de temperatura, estágio a valores constantes e diminuição também gradual. Na primeira fase, procura-se baixar a viscosidade da resina para a eliminação de voláteis e promover o fluxo de resina, de modo a garantir teores de fibra elevados e homogéneos. A seguinte etapa é a cura e consolidação do componente, na qual a pressão desempenha o papel mais relevante. Este processo de moldagem esta frequentemente associado a materiais compósitos laminados. Para a obtenção desses laminados, um pré-impregnado é cortado e empilhado sobre o molde, na sequência pretendida e até atingir a espessura desejada, seguidamente o conjunto é inserido num saco de vácuo, ver Figura 14, e sujeito a um ciclo de pressão e temperatura definido. Como desvantagens, é o forte investimento inicial e o tempo necessário para a obtenção das peças, o que faz com que o processo não seja a adequado para um grande número de series [4].



Figura 13 Autoclave.

A aplicação dos sacos de vácuos nos laminados é uma operação necessária para se obter a compactação uniforme das camadas e simultaneamente extrair voláteis, solvente e humidade, evitando a formação de porosidades ou vazios e remover o excesso de resina, para evitar zonas de bolsas de resina pura. É necessário produzir um saco de filme flexível, cujo material escolhido seja compatível com a temperatura e o tempo de cura dos laminados e a espessura do filme seja resistente à pressão [26].

Na construção do saco de vácuo é necessário o filme plástico, tecido separador, tecido absorvedor do excesso de resina, tecido canalizador para a remoção de ar, chapa de compactação, tecido superficial removível, bico para vácuo e fita selante para vedar o contorno da placa [26].

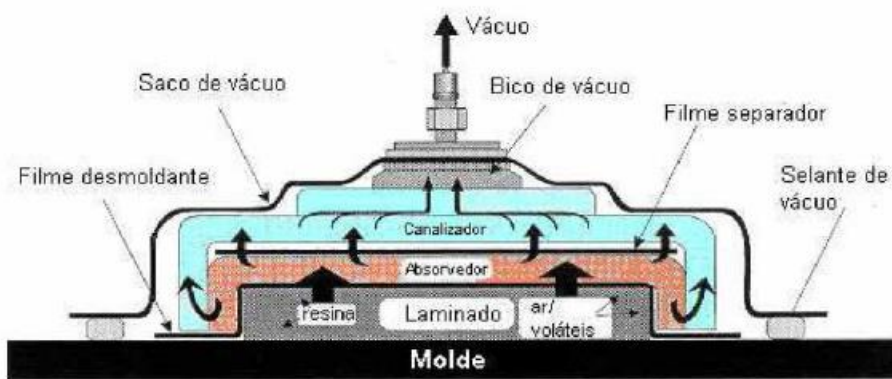


Figura 14 Representação esquemática de uma bolsa de vácuo [27].

2.5 Reciclagem de materiais compósitos

Os materiais compósitos são cada vez mais usados nas diversas aplicações do dia-a-dia, tornando necessário a sua reciclagem, uma vez que estes são constituídos por polímeros, que são não biodegradáveis apresentando um vida quase infinita quando depositados em aterros, o que continuam a poluir o meio ambiente, uma das formas que poderiam usar para eliminar estes materiais seria o recurso a incinerações, mas com esta técnica iria desperdiçar-se muitos

matérias, que apresentam um valor comercial elevado, tais como fibras de carbono e aramida. Sendo assim nasce a necessidade da reciclagem destes materiais [4].

As técnicas atualmente mais usadas para a reciclagem de compósitos são trituração, pirólise, incinerações (desde que a sua energia produzida seja aproveitada para outros fins) e dissolução por ácidos [4].

Esta reciclagem pode ser dividida em quatro categorias [4]:

- Primária: reprocessamento dos resíduos com o objetivo de obter um produto igual ou similar ao original. Em geral é o que acontece com os componentes fabricados com resinas termoplásticas não reforçadas;
- Secundária: o produto obtido após reciclagem não apresenta as mesmas propriedades do material original, isto é devido, ao facto de na vida do produto, algumas das suas propriedades degradarem-se. Na trituração os resíduos dos compósitos são cortados num tamanho adequado para servirem como cargas noutras aplicações, no caso da matriz termoplástica, os materiais resultantes são usados no processo de moldação por injeção ou compressão, numa matriz termoendurecível são usados como cargas nos compostos de moldação;
- Terciária: os polímeros usados no compósito são separados dos seus componentes químicos. Os hidrocarbonetos obtidos podem ser usados como monómeros, polimérico, fuels e outros produtos químicos, contribuindo para a conservação dos recursos petrolíferos. As fibras obtidas por este processo podem ser usadas para compostos de moldação. Na pirólise, o polímero é decomposto sob temperaturas elevadas e na ausência de oxigénio, produzindo assim hidrocarbonetos reutilizáveis;
- Quaternária: os resíduos são queimados e a energia obtida a partir do gás ou fuel produzidos pelo processo é usado para outras aplicações.

3 Propriedades mecânicas dos materiais compósitos

3.1 Introdução

Os materiais são designados de homogêneos quando as suas propriedades são as mesmas em todos os pontos ou são independentes da localização. O conceito de homogeneidade está associado a uma escala ou volume característica e pela definição de propriedade envolvida, o material pode ser mais homogêneo ou menos homogêneo, dependendo da escala observada. Se existir baixa variabilidade das propriedades de ponto para outro, numa escala macroscópica, o material é referenciado como quase homogêneo [8].

Um material é isotrópico quando tem as mesmas propriedades em todas as direções, independentes da orientação do eixo de referencial usado. Muitas propriedades do material, como rigidez, resistência mecânica, expansão térmica e condutividade térmica são associadas à direção dos eixos [8].

Um material é anisotrópico quando as suas propriedades em cada ponto variam com a direção ou dependem da orientação dos eixos de referência. Se as propriedades do material ao longo de uma qualquer direção são as mesmas ao longo de uma direção simétrica em relação a um qualquer plano, então esse plano é definido como plano de simetria do material. Podem existir um, dois, três, infinitos planos de simetria material, ou nenhum plano. Um material isotrópico tem infinitos planos de simetria [8].

Os materiais têm comportamento ortotrópico quando as propriedades num plano são iguais, mas distintas das que ocorrem numa direção ortogonal a esse plano. Os materiais compósitos são materiais ortotrópicos, isto é, são materiais de três planos de simetria perpendiculares entre si. As interseções destes planos definem três eixos perpendiculares entre si, chamados de eixos principais de simetria material, ou simplesmente, eixos principais do material [8].

Os compósitos de fibras longas são considerados de um ponto de vista macromecânico, meios contínuos, homogêneos e anisotrópicos. Além disso devido ao arranjo das fibras dentro da matriz eles passam a apresentar planos de simetria elástica, o que reduz o seu grau de anisotropia, esse arranjo obedece a uma disposição simétrica com relação a um eixo [28].

3.1.1 Análise geral de sólidos anisotrópicos

Um tensor elástico anisotrópico pode ser obtido usando a equação geral da elasticidade [8, 29]

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad \text{Com } i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad 1$$

onde σ_{ij} é o tensor das tensões, ϵ_{kl} , é o tensor das deformações, C_{ijkl} é o tensor elástico e as direções 1-2-3 formam um sistema de eixos triedro direto, tanto o tensor das tensões como o tensor das deformações são simétricos, ou seja $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ e $\epsilon_{kl} = \epsilon_{lk}$ [8, 29].

É habitual no comportamento mecânico de um compósito usar uma notação mais simples para o tensor das tensões e deformações [8, 29].

$$\begin{array}{lll} \sigma_{11} = \sigma_1 & \sigma_{22} = \sigma_2 & \sigma_{33} = \sigma_3 \\ \sigma_{23} = \sigma_4 & \sigma_{31} = \sigma_5 & \sigma_{12} = \sigma_6 \end{array} \quad 2$$

As componentes do tensor das deformações também se podem escrever de uma forma análoga. Sendo assim, a equação 1 vem [8, 29]:

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^6 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{Com } i,j=1,\dots,6 \quad 3$$

Por existir simetria material o tensor das tensões e das deformações reduz o número de componentes do tensor elástico, relativo a uma análise tridimensional, de 81 para 36 componentes [8].

Sendo W, energia de deformação - o trabalho por unidade de volume [8]:

$$W = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad 4$$

De tal forma que [8]:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad 5$$

Então as componentes independentes do tensor elástico reduzem-se a 21 dado que a equação 5 requer $C_{ijkl} = C_{klij}$, as matrizes de rigidez são simétricas. Assim para um material anisotrópico, caso mais geral, temos um número máximo de 21 componentes independentes no tensor elástico. Quando existem planos de simetria material, este número de componentes vai diminuindo [8, 29].

Pela Figura 15 a direção do eixo x_1 é paralela à direção da fibra, no eixo x_2 transversal na direção da fibra e no plano da camada e o eixo x_3 perpendicular ao plano da camada [30].

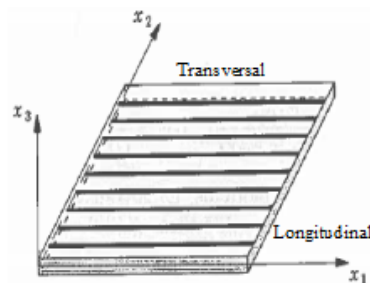


Figura 15 Camada compósita reforçada com fibras unidirecionais [30].

Para um material ortotrópico, o número de componentes independentes do tensor elástico reduz-se apenas a nove, neste caso o tensor elástico escreve-se [8]:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad 6$$

Ortotropia

Nos materiais ortotrópicos, é designado isotropia transversal quando se considera que uma camada apresenta simetria, o que faz com que existam três planos de simetria, sendo um deles isotrópico por exemplo o plano 1-2 é de isotropia material, (ver Figura 15) então o tensor de elasticidade vem [8, 29]:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad 7$$

Isotropia transversal

Pegando novamente no tensor ortotrópico, este pode ser invertido de forma a obterem-se as deformações em função das tensões [8, 29].

$$\varepsilon_i = a_{ij} \sigma_j \quad \text{Com } i, j = 1, \dots, 6 \quad 8$$

Onde, a_{ij} – representa a matriz de deformabilidade e é a inversa da matriz de flexibilidade, pode ser relacionada com as constantes de elasticidade já conhecidas.

Assim tracionando o provete em cada uma das três direções ortogonais x_1, x_2, x_3 e solicitando-o ao corte nos planos x_1 - x_2, x_2 - x_3, x_1 - x_3 , os termos a_{ij} relacionam-se com as constantes físicas do material, da forma [8, 29]:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad 9$$

Devido à reciprocidade dos termos temos [8, 29]:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad \text{Com } i, j = 1, 2, 3 \quad 10$$

Então para um corpo ortotrópico, temos que considerar doze constantes físicas que devido à reciprocidade acima as constantes ficam reduzidas a nove. Tendo em conta a simetria transversal isotrópica, temos a considerar apenas sete constantes físicas que devido à equação 10 reduzem-se a seis. Este número ainda pode ser reduzido a cinco variáveis [8, 29]:

$$E_1, E_2 = E_3 = E \quad 11$$

$$G_{12} = G_{13} \quad 12$$

$$\nu = \nu_{23} = \nu_{32}, \nu_{13} = \nu_{12} \text{ ou } \nu_{31} = \nu_{21} \quad 13$$

Dado que devido à isotropia no plano x_2 - x_3 , temos [8, 29]:

$$G_{23} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad 14$$

A notação acima usada é referente às publicações da teoria elástica, contudo nas publicações de materiais compósitos é usado outra notação. Sendo assim passa-se a usar os termos abaixo [4, 8]:

$$\begin{aligned}
 Q_{ij} &= C_{ij} & \text{Com } i,j=1,2,6 \\
 S_{ij} &= a_{ij} & \text{Com } i,j=1,2,6 \\
 Q_{ij} &= \frac{C_{ij}}{2} & \text{Com } i,j=4,5 \\
 Q_{66} &= \frac{C_{66}}{2} - \frac{C_{36}^2}{2C_{33}}
 \end{aligned} \tag{15}$$

3.1.2 Relações elásticas para uma camada de um compósito

No presente trabalho o material compósito estudado tem o formato de um compósito laminar. A lâmina é uma camada plana ou curva de fibras unidirecionais ou tecido introduzido numa matriz [8]. Uma camada de fibra de reforço unidirecional é tratada como um material ortotrópico por causa dos planos de simetria material serem paralelos e transversais na direção da fibra. Os laminados utilizados por apresentarem uma espessura, h , muito mais pequena do que as restantes dimensões é frequente admitir que as camadas estão em estado plano de tensão, isto é na direção da espessura, $\sigma_{33} = \tau_{13} = \tau_{23}$ tem valores desprezáveis quando comparados com as tensões no plano 1-2 da camada, ver Figura 15 [29].

A matriz que relaciona o vetor tensão com o vetor deslocamento para uma camada genérica, nos eixos de ortotropia (longitudinal e transversal). Para o estado plano de tensão, a matriz de rigidez, Q , no estado plano de tensão vem: [8]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \tag{16}$$

e a matriz de flexibilidade, S vem [8]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \tag{17}$$

onde [8]

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \tag{18}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \tag{19}$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \tag{20}$$

$$Q_{66} = G_{12} \tag{21}$$

$$Q_{16} = Q_{26} = Q_{61} = Q_{62} = 0 \tag{22}$$

Seguidamente calcula-se a matriz que relaciona no sistema de eixos (x,y) (referencial global) o vetor tensão com o vetor deformação para uma dada camada com uma orientação específica em função das constantes de elasticidade da camada no referencial (L,T) . Como normalmente os eixos principais da camada não coincidem com os eixos de referência do

laminado (x,y), ver Figura 16, é necessário utilizar uma matriz de transformação de coordenadas [8]:

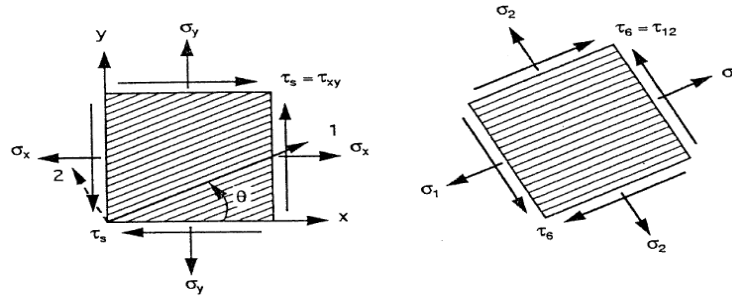


Figura 16 Rotação de referencial em torno do eixo z [8].

$$\begin{aligned}\{\sigma\}_{1,2} &= [T_1]\{\sigma\}_{x,y} \\ \{\varepsilon\}_{x,y} &= [T_2]\{\varepsilon\}_{x,y}\end{aligned}\tag{23}$$

onde a matriz, $[T_1]$, é a matriz transformação, T dada por [8]:

$$[T_1] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}\tag{24}$$

onde $m = \cos\theta$, $n = \sin\theta$ e $[T_2] = ([T_1]^{-1})^T$.

Tal que a transformação das relações tensão-deformação do sistema L-T para os sistema x-y é dado por [4]:

$$\begin{aligned}\{\sigma\}_{1,2} &= [T_1]^{-1}\{\sigma\}_{x,y} \\ \{\varepsilon\}_{x,y} &= [T_2]^{-1}\{\varepsilon\}_{x,y} = [T_1]^T\{\varepsilon\}_{x,y}\end{aligned}\tag{25}$$

substituindo na expressão 15

$$\begin{aligned}\{\sigma\}_{x,y} &= [T_1][Q_{ij}][T_1]^T\{\varepsilon\}_{x,y} \\ \{\sigma\}_{x,y} &= [Q']\{\varepsilon\}_{x,y}\end{aligned}\tag{26}$$

em forma matricial [4]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & 0 \\ Q'_{21} & Q'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}\tag{27}$$

3.1.3 Propriedades mecânicas do compósito

Uma vez, conhecidas as propriedades mecânicas da matriz e da fibra é necessário conhecer as propriedades do compósito. Um dos métodos usados para a determinação destas propriedades é a teoria clássica de laminados (TLC).

A determinação das constantes de um material reforçado com fibras contínuas assenta nos seguintes pressupostos [30]:

- existe uma adesão perfeita entre as fibras e a matriz;
- as fibras são paralelas e estão repartidas de forma uniforme;
- a matriz encontra-se livre de vazios ou microfissuras e num estado livre de tensão;

- as fibras e a matriz são materiais isotrópicos e obedecem à lei de Hooke;
- as cargas aplicadas ou são paralelas ou perpendiculares à orientação das fibras.

As distribuições das deformações nas direções x e y, segundo TCL, variam linearmente através da espessura do laminado[8]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

Considerando uma camada individual k, a relação tensão deformação passa a ser escrita, através da substituição da 28 na equação 27 [4, 8]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & 0 \\ Q'_{21} & Q'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q'_{66} \end{bmatrix}_k \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{Bmatrix} \right) \quad (30)$$

A distribuição de tensão ao longo da espessura do laminado não é linear e as tensões são descontínuas nas interfaces entre camadas. Pelo facto das tensões variarem de camada para camada é conveniente definir esforços, {N}, e momentos {M} que atuam por unidade de comprimento através da espessura, h, do laminado [4, 8]:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xz} \end{Bmatrix}_k = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}_k dz \quad (31)$$

e

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xz} \end{Bmatrix}_k = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}_k z dz \quad (32)$$

donde resulta as equações fundamentais da TCL [4, 8]:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xz} \end{Bmatrix}_k = [A_{ij}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + [B_{ij}] \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xz} \end{Bmatrix}_k = [B_{ij}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + [D_{ij}] \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad 34$$

onde as matrizes A representa a matriz de rigidez, a matriz B de acoplamento membrana-flexão e matriz D matriz de flexão [4]:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k - z_{k-1}) \quad 35$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad 36$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad 37$$

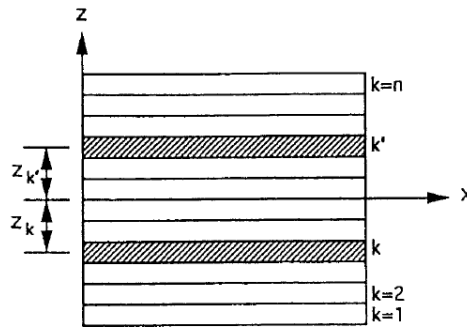


Figura 17 Sequência de empilhamento considerada [8].

As equações 33 e 34 vêm:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ K \end{Bmatrix} \quad 38$$

3.1.4 Regra das misturas

Através da TLC pode-se fazer uma estimativa para o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson de um material compósito reforçado com fibras, podendo ser expressas em função dos módulos de elasticidade, dos coeficientes de Poisson e das frações volúmicas dos seus constituintes. Os modelos mais conhecidos para determinar o módulo de elasticidade são os de Voigt e de Reuss, baseados na regra das misturas [30].

O modelo de Voigt é formulado a partir da condição de isodeformação. Considerando um compósito laminar sujeito a uma carga P_c aplicada no material provoca uma deformação uniforme em todas as camadas do compósito, admitindo que a ligação entre as camadas permanece intacta durante o carregamento e a deformação da fase contínua e da fase dispersa são iguais à deformação do compósito $\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$, (condição de isodeformação) [1, 31].

A força aplicada no compósito é igual à soma da força aplicada nas camadas da fibra e da matriz $P_c = P_f + P_m$ [1, 31].

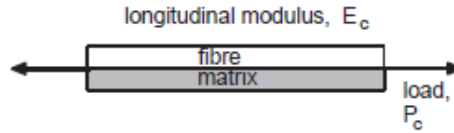


Figura 18 Compósito laminar onde está aplicado uma carga nas condições de isodeformação [31].

A tensão do compósito, σ_c , é descrita em termos das tensões e das frações volumétricas da fase matriz, V_m , e da fase do reforço, V_f .

Numa camada de um compósito o volume total deve ser constituído pelo volume da fibra, volume da matriz e volume dos vazios $V_f + V_m + V_v = V_t$. O volume de vazios, V_v corresponde ao volume ocupado por bolhas de ar e gases que emanam da resina durante a cura [31].

$$V_f = v_f / v_t \quad 39$$

$$V_m = v_m / v_t \quad 40$$

$$V_v = v_v / v_t \quad 41$$

$$V_f + V_m + V_v = 1 \quad 42$$

Contudo para uma boa qualidade de um compósito estrutural, a percentagem dos volumes de vazios tem de ser muito baixa, para serem desprezáveis, sendo assim a equação 42 só tem em conta o volume da matriz e da fibra $V_f + V_m = 1$ [32].

Outra forma de calcular o teor de reforço é partir do teor da massa do compósito é dado pela equação 44, esta foi a forma para se calcular a percentagem volúmica de fibra existente nos compósitos construídos neste trabalho [32]:

$$m_c = v_f \cdot \rho_f + v_m \cdot \rho_m \quad 43$$

$$V_f = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}} = \frac{m_f \rho_m}{m_f \rho_m + m_m \rho_f} \quad 44$$

Da relação $\sigma = P/A$

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad 45$$

$$\sigma_c V_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad 46$$

$$\frac{\sigma_c V_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_f V_f}{\epsilon_f} + \frac{\sigma_m V_m}{\epsilon_m} \quad 47$$

$$E_1 = V_f E_f + V_m E_m \quad 48$$

onde σ_c , σ_f e σ_m representam as tensões do compósito da fibra e matriz, respetivamente, A_c , A_f e A_m representam as áreas do compósito da fibra e matriz, respetivamente. E_f Módulo da fibra e E_m Módulo da matriz da equação anterior é conhecido módulo longitudinal do compósito, E_1 [1, 31].

Para se obter uma estimativa do modulo transversal do compósito, E_2 , consideramos o caso de um compósito laminar, ficar sujeito a uma tensão perpendicularmente em relação às

camadas da matriz e da fibra, neste caso a tensão é igual em todas as camadas, $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$, caso de isotensão. A extensão total do compósito é a soma das duas componentes [1, 31].

$$\varepsilon_c L_c = \varepsilon_f L_f + \varepsilon_m L_m \quad 49$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\sigma_c} = \frac{\varepsilon_f V_f}{\sigma_f} + \frac{\varepsilon_m V_m}{\sigma_m} \quad 50$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad 51$$



Figura 19 Compósito laminar onde está aplicado uma carga nas condições de isotensão [31].

As regras das misturas não levam em conta a presença de vazios nem os efeitos da interface, considerando uma interface perfeita entre a matriz e a carga. Estes modelos apresentam os limiares superiores e inferior para os possíveis valores do módulo de elasticidade [1, 31].

3.1.5 Coeficiente de Poisson

Para o cálculo do valor do coeficiente de Poisson vem [30]:

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad 52$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \quad 53$$

v_f Coeficiente de Poisson da fibra;

v_m Coeficiente de Poisson da matriz;

V_f Fração de volume da fibra;

V_m Fração de volume da matriz.

v_{12} é o coeficiente de Poisson principal e G_{12} é o módulo de elasticidade transversal, sendo [30]:

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + v_f)} \quad 54$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + v_m)} \quad 55$$

Quando a camada é constituída por fibras no formato de tecidos bidirecionais as propriedades dependem também do número de fios de trama e de teia. Nesse caso define-se o parâmetro k que relaciona o número de fios nas duas direções como [33]:

$$k = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad 56$$

sendo que n_1 é o número de fios da teia e n_2 , é o número de fios da trama [34].

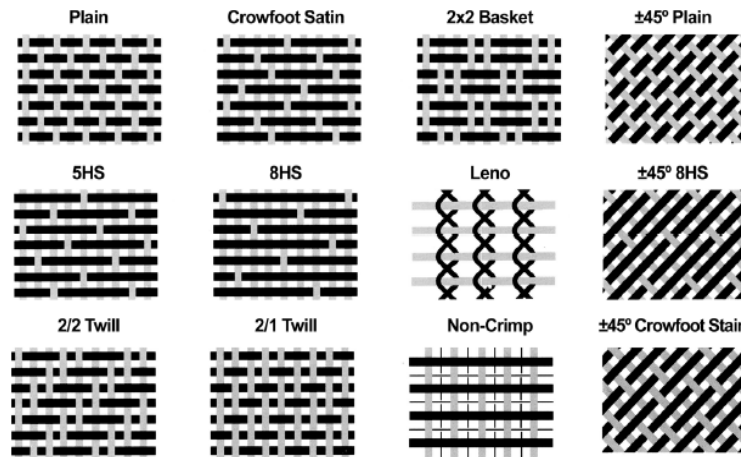


Figura 20 Tipos de tecido [34].

Usando a equação 56 nas constantes de elasticidade das equações 48, 51 e 53 para um laminado com um reforço bi-direcional, as constantes de elasticidade ficam [32]:

$$E_x = kE_1 + (1-k)E_2 \quad 57$$

$$E_y = (1-k)E_1 + kE_2 \quad 58$$

$$G_{xy} = G_{12} \quad 59$$

$$\nu_{xy} = \nu_{12} / (k + (1-k) \frac{G_{12}}{E_2}) \quad 60$$

Note-se que no caso $n_1 = n_2$, tem-se $E_x = E_y$ e $\nu_{xy} = \nu_{12}$. Esta situação ocorre no caso das telas *plain*, ver Figura 20. No caso das mantas são consideradas materiais isotrópicos no plano x-y, as suas constantes de elasticidade vem [33]:

$$E_{manta} = \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T \quad 61$$

$$G_{manta} = \frac{E_{manta}}{2(1+\nu_{manta})} \quad 62$$

$$\nu_{manta} = 0,3 \quad 63$$

4 Mecânica da fratura

4.1 Introdução

A mecânica da fratura tem por objetivo caracterizar o comportamento dos materiais à fratura (o estudo da propagação de uma fenda). Inicialmente a sua utilização só era usada em ligas metálicas de alto rendimento, na indústria aeroespacial, donde surgiu a Mecânica da Fratura Linear Elástica. Posteriormente foi aplicada em construções soldadas dando origem a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, ultimamente com o aumento do uso dos materiais compósitos tem surgido o interesse da aplicabilidade da mecânica da fratura nestes materiais. No caso da Mecânica da Fratura Linear Elástica, a tenacidade à fratura é dado pelo fator de intensidade de tensão, K , representado sobre a forma da geometria do provete e o carregamento efetuado ou pela taxa de libertação de energia G , este conceito é só para um grupo de materiais onde a propagação da fenda se encontra na região plástica, podendo ser usada para caracterizar a fratura frágil. Contudo a grande maioria dos materiais encontra-se no grupo da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, onde apresentam uma alta ductilidade, aqui usa-se o integral de J para caracterizar a tenacidade à fratura [4, 35].

4.2 Teoria de Griffith

Os primeiros passos na mecânica da fratura foram dados por Griffith em 1920, através de ensaios experimentais concluiu que a diferença entre os valores teóricos e reais da resistência à rotura ocorriam devido à existência de fissuras muito pequenas existentes nos materiais e deste modo ocorria a rotura no elemento crítico [4, 36].

Para demonstrar o que acima foi referido, Griffith recorreu ao balanço energético representado pela equação 64, a condição crítica para a propagação da fenda é que a variação da energia potencial experimental seja igual à energia necessária para formar uma superfície:

$$\frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} = \gamma \quad 64$$

onde W representa o trabalho das forças externas aplicadas sobre o corpo, U representa a energia de deformação interna do sólido e dA é a variação de superfície da fissura ($dA = 4Bda$, para uma placa de espessura B com uma fenda interna de comprimento $2a$) [4, 36].

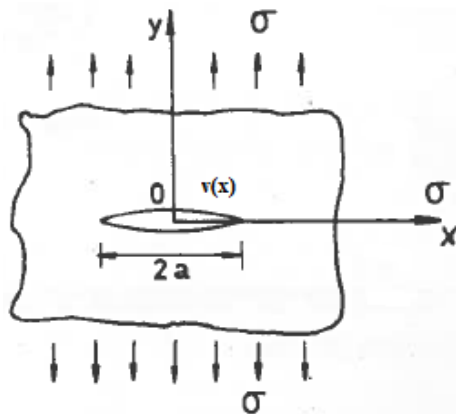


Figura 21 Fissura interna a toda a espessura do sólido [36].

A abertura da fenda no caso da figura acima pode ser dada pela expressão de Westergaard, no caso estado plano de tensão:

$$v(x) = \frac{2\sigma_R}{E}(a^2 - x^2)^{1/2} \quad 65$$

onde $v(x)$ representa o deslocamento, σ_R representa a tensão remota aplicada, “ a ” representa o comprimento da fenda e E representa módulo de elasticidade [4, 36].

$$W - U = 4B \int_0^a \frac{1}{2} \sigma_R v(x) dx = \frac{\pi a^2 \sigma_R^2 B}{E} \quad 66$$

onde se deduz

$$\sigma_C = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad 67$$

onde σ_C representa a tensão crítica para a qual ocorre a rotura [4, 36].

Sempre que uma fissura se propaga vai dar origem a duas novas superfícies, a energia de superfície por unidade de largura devido à propagação da fissura de uma quantidade é dada por:

$$dW - dU = G da \quad 68$$

onde G representa a taxa de libertação de deformação, caso haja propagação:

$$G = G_C = 2\gamma_s \quad 69$$

O que acima foi referido só se aplica em materiais idealmente frágeis, contudo na realidade existem sempre mecanismos de dissipação de energia associados à deformação inelástica na extremidade da fenda, sendo assim, foi descrito uma zona na extremidade da fissura onde estes processos ocorrem, que se denomina por zona de processo. Esta zona deverá apresentar um comprimento inferior ao da fenda, para se aplicar a mecânica da fratura linear elástica. Nos materiais compósitos os mecanismos de dissipação de energia na zona de processo incluem rotura de fibra e de matriz, plastificação local da matriz, descoesão interfacial fibra/matriz, arrancamento de fibras e ponte de fibra, estes mecanismos fazem parte da energia por unidade de superfície de fissura, γ_f , que é superior à energia de superfície γ_s , portanto a taxa de libertação de energia é dada por:

$$G = 2(\gamma_s + \gamma_f) \quad 70$$

partindo da equação 64 com a 68, podemos escrever:

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad 71$$

considerando uma placa de espessura constante B :

$$GB = \frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} \quad 72$$

a equação acima traduz o facto de a energia de fratura, ou taxa de libertação de energia de deformação ser igual à variação da energia potencial devido ao incremento de propagação de fissura. Na ausência de propagação de fissura o trabalho das forças exteriores é igual ao trabalho das forças interiores de deformação. Quando há propagação de fissura parte da energia interna de deformação liberta-se, daí a designação de taxa de libertação de energia de deformação. A propagação da fenda ocorre quando for atingida a taxa crítica de libertação de energia G_C . O critério energético é baseado na hipótese de que, a propagação de um defeito

interno ocorrerá quando a energia disponível na extremidade desse defeito (G – taxa de libertação de energia) igualar a energia necessária à propagação da fenda, G_c , taxa crítica de libertação de energia, devido ao carregamento aplicado. A taxa crítica de libertação de energia G_c , é uma propriedade do material. Portanto, a condição crítica de não propagação da fenda resultante do balanço energético pode ser expressa por:

$$G \leq G_c \quad 73$$

A determinação experimental de G_c pode ser feita através de ensaios experimentais a carga P constantes ou deslocamento δ constantes [4].

4.3 Modos de sollicitação

A fratura das juntas ocorre segundo três modos diferentes de sollicitação, conforme a Figura 22. O modo I representa o modo de abertura, e ocorre quando esforços de tração provocam a abertura da fenda. Enquanto o modo II e III são modos de corte, e ocorre quando a frente da fenda é sujeito a esforços de corte. No modo II as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à fenda e no modo III o movimento é paralelo à frente a fenda [4].

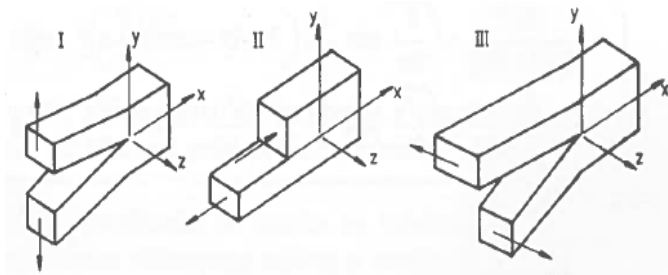


Figura 22 Modos de deformação [4].

O fator de intensidade de tensão, K representa um parâmetro de escala definida da alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda, motivado pela existência de tensões infinitas nessa zona, portanto é considerado um parâmetro local. O fator de intensidade de tensão K , é definido por [4]:

$$K_I = Y \sigma_r \sqrt{\pi a} \quad 74$$

onde Y é função adimensional da geometria e distribuição da carga, σ_r tensão remota aplicada na direção perpendicular aplicada à direção da fenda e “ a ” representa o comprimento da fenda.

É assumido que a propagação da fenda ocorre quando K atinge seu valor crítico, K_{cl} :

$$K_{cl} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad 75$$

em que, σ_c , representa o valor da tensão crítica do material [4].

A distribuição das tensões em função de r e θ na zona próxima da extremidade da fenda, contida numa placa infinita é da dado por:

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad 76$$

estas equações são válidas para materiais homogêneos e isotrópicos, o valor das tensões de um dado ponto em função das coordenadas (r, θ) , como podemos observar pela Figura 23, depende somente do valor do fator de intensidade de tensão. Nos materiais anisotrópicos o valor dessas tensões, é dependente, do fator de intensidade de tensão e da matriz flexibilidade. A análise de Griffith não pode ser aplicada nos compósitos, devido á sua heterogeneidade [4, 36].

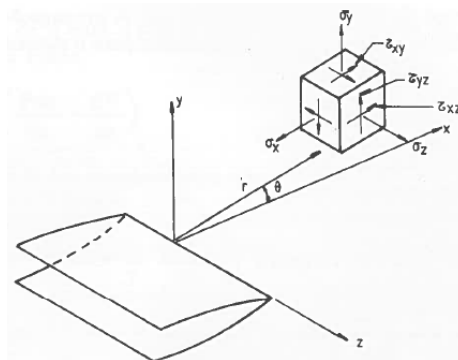


Figura 23 Estado de tensão na vizinhança de uma fenda[36].

Devido à heterogeneidade destes materiais foi proposto um novo conceito – *zona de dano* na vizinhança da extremidade da fenda. A propagação da fenda depende da formação e propagação de uma zona de dano na vizinhança da fissura, causada por uma elevado número de microfissuras causadas por descoesão fibra/matriz, rotura de fibra ou matriz. Para que os conceitos da mecânica da fratura linear elástica sejam aplicados é necessário que o tamanho da fissura seja muito superior à zona de dano [4].

4.4 Mecânica da fratura em compósitos reforçados com fibras

4.4.1 Rotura de materiais compósitos

A rotura nos materiais compósitos pode ser dividida em duas categorias, a rotura intralaminar e a interlaminar, ver Figura 24. No caso da rotura intra-laminar, ocorrer rotura nas camadas do compósito que pode ser ao nível da matriz, rotura das fibras e descoesão interfacial fibra/matriz, atrito fibra/matriz após a descoesão, arrancamento de fibra (*“fibre pull-out”*) e ponte de fibras (*“fibre bridging”*). A fratura interlaminar, ou delaminação, consiste num descolamento entre duas camadas contíguas normalmente ocorre entre camadas com diferentes orientações, este tipo de fratura é muito comum nos materiais de fibras contínuas, sendo o mecanismo de fratura mais comum nas fibras de alto desempenho [4, 35]. Estes mecanismos de rotura podem ocorrer simultaneamente durante o processo de fratura, de referir que mecanismos de rotura dependem do compósito estudado, do tipo de carregamento aplicado e da orientação das fibras. Quando as fibras estão orientadas paralelamente à direção da propagação da carga a rotura ocorre por descolamento das fibras, no caso de as fibras estarem orientadas perpendicularmente à orientação da carga verifica-se rotura por deslizamento e rotura das fibras [4].

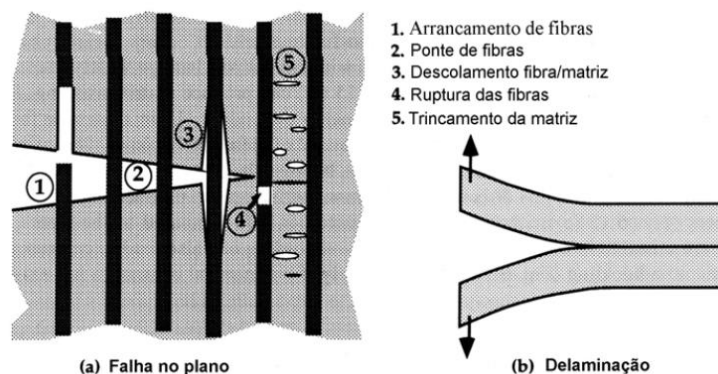


Figura 24 Representação esquemática dos mecanismos de rotura de um material compósito[35].

4.4.1.1 Fratura da fibra

Quando a fenda se propaga na direção normal da fibra, estas acabam por se separar o que conduz à separação completa do laminado, ocorre sob carregamento de tração quando a tensão máxima admissível ou deformação da fibra é excedida, ou seja, as fibras fraturam quando atingem o seu limite máximo de deformação. Apesar das fibras serem responsáveis pela resistência mecânica do material, a fratura das fibras representa uma percentagem de energia muito baixa relativamente à quantidade de energia absorvida pelo material compósito. No entanto a presença das fibras influencia o modo de cedência do material, e por conseguinte, a energia total absorvida, após impacto[37].

4.4.1.2 Deformação e fratura da matriz

Para ocorrer a fratura total do compósito, o material da matriz que envolve as fibras deve fraturar completamente. As resinas termoendurecíveis, tal como as resinas de epóxico e poliéster são materiais frágeis, a quantidade de energia absorvida por estas, mediante impacto é praticamente insignificante, apesar de haver absorção de energia devido à deformação da fratura da matriz, a energia absorvida por deformação plástica é consideravelmente mais elevada [37].

4.4.1.3 Separação entre fibra/matriz

Durante a fratura pode ocorrer a separação entre a matriz e as fibras, pelo motivo das fendas que se propagam paralelamente às fibras. Neste processo, as ligações químicas ou secundárias entre as fibras e a matriz são quebradas. Este tipo de fratura ocorre quando fibras são fortes e a matriz é frágil. Se a separação é extensiva conduz a um aumento da energia absorvida durante o impacto. O aumento da energia absorvida pode aumentar com a diminuição da força de ligação presente nas interfaces, uma vez que tal promove delaminação e separação entre fibra/matriz [37].

4.4.1.4 Arrancamento de fibra

Ocorre quando fibras frágeis ou fibras descontínuas são embebidas numa matriz de elevada resistência. A fratura das fibras origina uma concentração de tensões local onde a fibra foi quebrada. Esta concentração de tensões pode ser aliviada através da cedência da matriz, evitando que esta quebre. Nesta situação, as fibras são arrancadas do interior da matriz. A diferença entre arrancamento e separação das fibras/matriz consiste no seguinte, a separação da fibra/matriz ocorre quando a fenda na matriz é incapaz de se propagar através da fibra, enquanto o arrancamento de fibra deve-se à falta de capacidade da fenda iniciada na quebra da fibra se propagar pela matriz. Os arrancamentos de fibra são geralmente acompanhados pela deformação extensiva da matriz, o que não acontece na separação fibra/matriz. Apesar de estes fenómenos parecerem semelhantes por se darem na região da interface, estes acontecem mediante condições distintas. No entanto, ambos são responsáveis por um aumento de energia absorvida durante a fratura [37].

4.4.1.5 Fenda de delaminagem

A propagação de uma fenda por uma camada pode parar quando atinge as fibras de uma camada adjacente. Por causa das altas tensões de corte adjacentes à crista da fenda, a fenda pode dividir-se e propagar-se paralelamente ao plano das camadas. Estas fendas são chamadas de fendas de delaminagem. A delaminagem ocorre frequentemente quando os laminados são testados à flexão [37].

4.5 Método experimental de obtenção da tenacidade em estado de deformação plana

No presente trabalho foi usado a norma ASTM D5045-99, para a determinação da tenacidade de um provete no estado plano de deformação

Os ensaios dos provetes CTS (“*Compact Tension Specimen*”) ou SENB (“*single-edge-notch bending*”) são alguns ensaios experimentais usados para a obtenção do valor da tenacidade. Para garantir a existência de um estado plano de deformação, requer que a largura do provete, B , e o comprimento de fissura, a , obedeçam à seguinte relação [4]:

$$a, B, (w - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ced}} \right)^2 \quad 77$$

onde σ_{ced} representa a tensão de cedência do material. No caso dos metais, o provete inicialmente fica sujeito a uma solicitação de fadiga para provocar o aparecimento de uma fissura inicial, a partir do entalhe maquinado, (neste trabalho, os compósitos não foram sujeitos a uma solicitação de fadiga, a fenda inicial foi feita através de uma lâmina). Sendo que o valor da carga máxima nesta solicitação deve estar condicionado, de modo a que a zona plástica na extremidade da fissura durante a propagação, seja de dimensões reduzidas. A determinação da tenacidade faz-se a partir da curva força-deslocamento. A propagação da fissura está relacionada com um desvio da curva relativamente à linearidade, que pode ou não

coincidir com a força máxima [4, 36]. Na Figura 25 podemos observar os provetes CT e SENB.

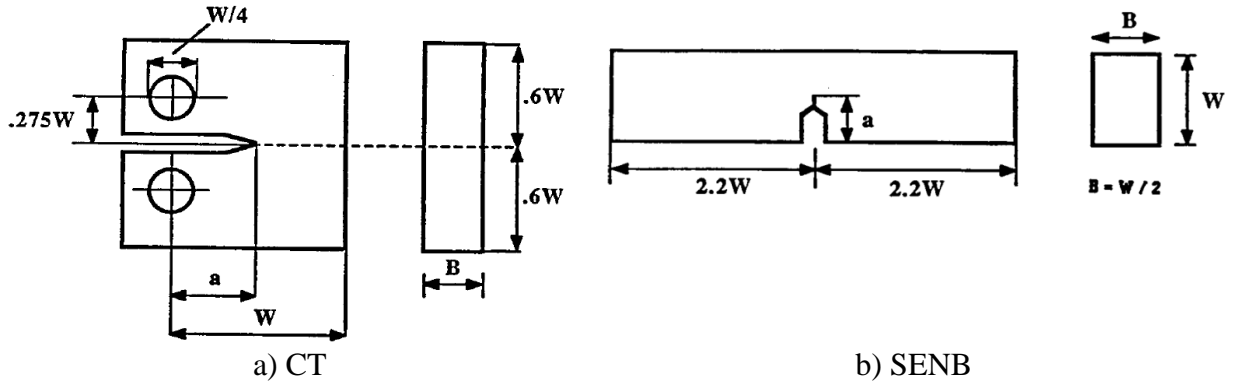


Figura 25 Configuração dos provetes a) CTS e b) SENB E399 [38].

O teste consiste em carregar o provete até à propagação da fissura, a uma dada velocidade onde se regista a curva carga-deslocamento.

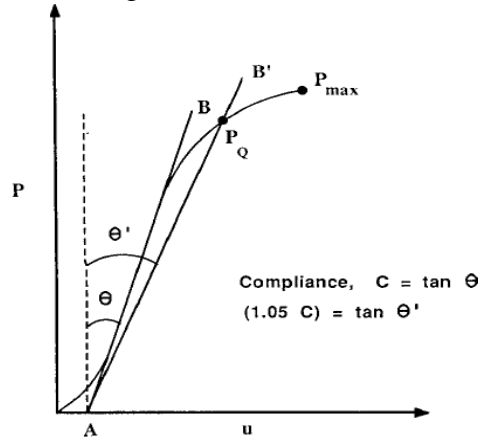


Figura 26 Curva carga-deslocamento[38].

No caso dos provetes CTS, ver Figura 25 a) o valor provisório do fator de intensidade de tensão, K_q é dado por [39]:

$$K_q = \frac{P_q}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad 78$$

e para o caso dos provetes SENB, ver Figura 25 b) o valor provisório vem [39]:

$$K_q = \frac{P_q S}{BW^{3/4}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad 79$$

onde S é a distância entre apoios.

Após a verificação da seguinte restrição [38, 39]:

$$\frac{P_{\max}}{P_q} < 1,1 \quad 80$$

caso não se verifique a equação 80 o ensaio é considerado invalido. No caso de se verificar $K_q = K_{Ic}$ e desta forma chegamos ao valor da taxa de libertação de energia, G_{Ic} , para um estado plano de deformação [38, 39]

$$G_{Ic} = \frac{(1 - \nu^2) K_{Ic}^2}{E} \quad 81$$

5 Procedimento experimental

Nesta seção vai-se descrever todos os processos experimentais realizados, sobretudo os materiais usados, os métodos de produção para a elaboração das placas e respectivos provetes a ensaios. Toda esta componente foi realizada nas instalações do INEGI (mais propriamente na unidade de materiais compósitos).

5.1 Materiais

5.1.1 Resina

Usou-se dois tipos de resinas termoendurecíveis, uma resina para a elaboração dos pré-impregnados, a resina epóxico SI Preg SR 121 e o endurecedor SC KTA 313, nas proporções de 100-21, respectivamente, a resina e o endurecedor utilizados são provenientes da empresa Sicomin (SC) e uma resina de poliéster insaturado com o nome comercial de A ROPOL FS 6923 (uma resina de poliéster ortoftálica) com um catalisador PMEK nas proporções de 100-1,5, respectivamente, fornecidos pela empresa MR Dinis dos Santos Lda.

Os pré-impregnados obtidos por resina de epóxico foram sujeitos a uma cura em autoclave, enquanto os compósitos obtidos por poliéster insaturado foram fabricados por moldação manual e curados em autoclave.

Na Tabela 6, podemos observar algumas das propriedades das resinas usadas no presente trabalho.

Tabela 6 Rigidez, carga máxima e deformação das resinas usadas no trabalho (valores dados pela ficha das resinas).

Resina	Solicitação	E – [MPa]	σ – [MPa]	ε – [%]
Epóxico	Flexão	3700	65	6,5
	Tração	3700	152	2
Poliéster insaturado	Flexão	-	100	1,8
	Tração	-	60	1,8

5.1.2 Reforço

Usou-se reforço de fibra de juta, na forma de tecido entrelaçado segundo direções perpendiculares, cada cordão de fibra orientado a 0° passa alternadamente por cima e por baixo de cada cordão de fibra a 90°, designando-se “*plane weave*”, e na forma de manta, fibras curtas e distribuídas aleatoriamente.

O reforço usado neste trabalho foi seco numa estufa, em trabalhos anteriores foi verificada uma melhoria das propriedades mecânicas quando é sujeito a este tratamento. Na Tabela 7, podemos observar a massa do reforço antes e após a secagem, para o cálculo da percentagem de fibra presente no compósito, considerou-se a massa do reforço seca.

Tabela 7 Peso do reforço antes e depois da secagem.

Tipo de reforço		Peso por unidade de área [gr/m ²]
Tecido	Sem secagem	310
	Com secagem	287
Manta	Sem secagem	660
	Com secagem	607

Na Tabela 8, está representado o tempo e temperatura de secagem, estes tempos e temperaturas foram alvos de estudo em trabalhos anteriores [40].

Tabela 8 Temperatura e tempo de secagem.

Tipo de reforço	Temperatura e tempo de secagem
Tecido	120°C durante 2h
Manta	120°C durante 2h

5.2 Produção das placas

Neste capítulo vai-se descrever as várias etapas para a elaboração de um compósito.

No caso do reforço na forma de tecido usou-se dois empilhamentos diferentes, um [0,90,0]_s e o outro [0,45,0]_s. Estes laminados são simétricos e constituído por seis camadas. No caso da manta só se usou uma camada de reforço.

5.2.1 Preparação das fibras

Inicialmente cortou-se o reforço com as dimensões de 300 × 300 mm. No caso do tecido cortou-se com orientações diferentes de modo a que os cordões das fibras fizessem entre si um angulo de 90° e 45°, ver Figura 27 a) e b).

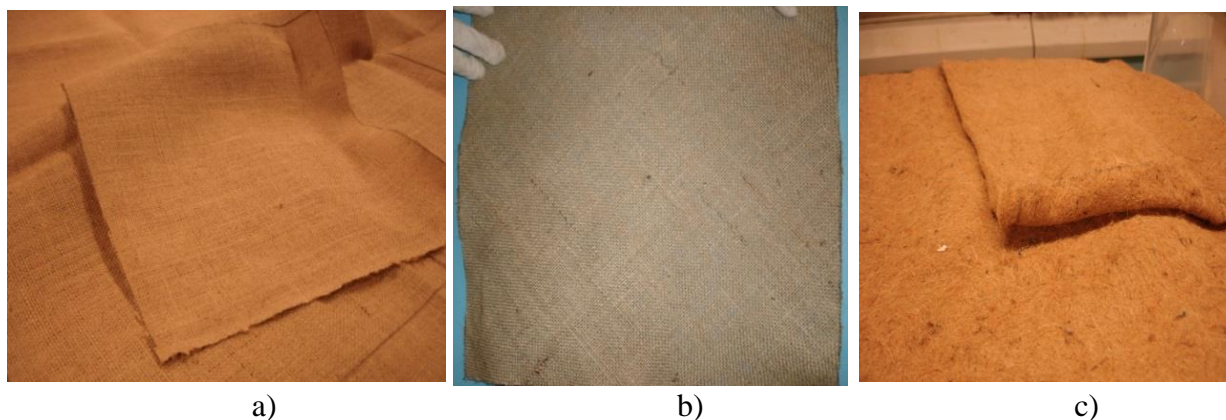


Figura 27 Representação do reforço com as diferentes orientações das fibras, a) cordões das fibras com um angulo de 90°, b) cordões das fibras com um angulo de 45° e c) manta.

De seguida, o reforço é seco num forno, com o objetivo de se retirar a humidade e dessa forma, obter-se uma melhor adesão da matriz polimérica.



Figura 28 Secagem das fibras no forno.

Após a secagem, os reforços devem ser imediatamente guardados num saco hermético para não reabsorverem a humidade, uma vez que a juta é muito hidrofílica.



Figura 29 Sacos hermético com a fibra.

Após esta sequência, passa-se para a elaboração dos laminados usando as diferentes matrizes e os diferentes modos de moldação.

5.2.2 Produção dos pré-impregnados

Neste trabalho usou-se pré-impregnados, que tal como foi referido na secção 2.3.1, são semi-produtos que mais tarde são usados para processar as placas.

Para a produção de pré-impregnados com resina epóxico (SR121 com o endurecedor SC KTA 313), numa fase inicial é colocado um papel siliconizado, e sobre este é colocado o reforço e depois a matriz. A matriz é espalhada com ajuda de um pincel e de rolos para facilitar a molhagem no reforço, depois coloca-se sobre estes, um filme protetor, ver Figura 30. Este pré-impregnado é sujeito a uma cura no forno à temperatura de 23°C durante 48 horas (deste modo é garantido o bom desempenho do conjunto matriz polimérica / fibra de reforço) como podemos ver pela Figura 31 a). Após este tempo, o pré-impregnado pode ser guardado a temperaturas baixas (por exemplo arca frigorífica), ver Figura 31 b).

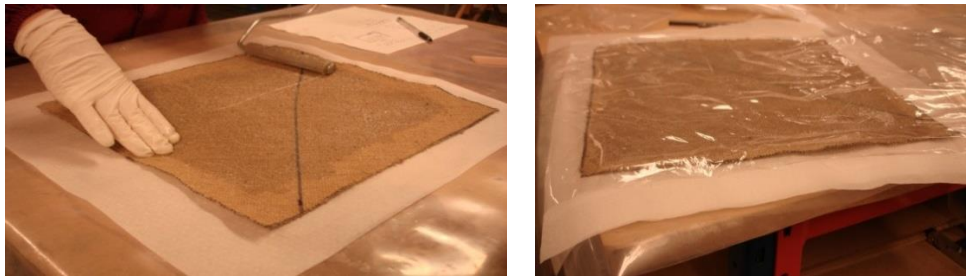


Figura 30 Produção do pré-impregnado.



Figura 31 a) Pré-cura no forno, b) armazenamento em ambiente de refrigeração.

Fez-se pré-impregnados com tecido e com manta. Todos os pré-impregnados foram curados em autoclave. Todas as placas em que apareça as letras APP foram moldadas por este processo (cura em autoclave (A) e com uma resina epóxico (PP)).

5.2.3 Moldação manual

Construiu-se três placas por moldação manual, duas delas com tecido com a orientação do laminado a $[0,90,0]_s$ e $[0,45,0]_s$ e a outra placa construída com o reforço na forma de manta. Neste processo usou-se resina de poliéster insaturado.

As etapas para a elaboração do compósito são as seguintes: inicialmente aplica-se sobre cada uma das faces do molde um desmoldante, cujo nome comercial é Paste Wiz, para facilitar a desmoldação da placa. Seguidamente, como podemos ver pela Figura 32 a) colocou-se o tecido ou manta sobre o molde, depois a matriz que é espalhada com a ajuda de um pincel e de rolos (para obtenção de bons laminados é necessário compactar as camadas com um rolo para eliminar saliências ou rugas, evitar a retenção de ar ou desalinhamento das fibras), esta etapa é repetida até se atingir uma espessura do laminado desejado. No final fechou-se o molde com recurso a parafusos e porcas como podemos ver pela Figura 32 b).

A pressão a que o compósito fica sujeito é a pressão de aperto dos pares parafuso/porca, esta pressão é limitada pela rigidez dos batentes que estão em toda a lateral do molde com o intuito de estabilizar a espessura da placa.

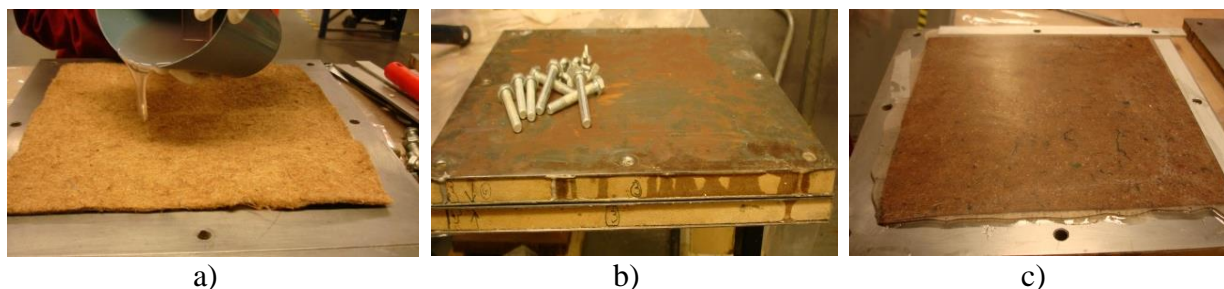


Figura 32 Etapas da moldação manual de uma manta, a) impregnação, b) aperto e c) placa.

Após a cura à temperatura ambiente obtém-se a placa representada pela Figura 32 c), as placas obtidas por moldação manual, foram sujeitas a uma pós-cura à temperatura de 80°C durante 3 horas.

As características deste compósito dependem de vários fatores, que não podem ser controlados com precisão, nomeadamente o controle da pressão aplicada em cada molde, temperatura de cura, que é a temperatura ambiente da sala em que decorreu o processo.

Todas as placas moldadas por este processo têm na sua designação as letras MP (M-moldação manual, P- poliéster insaturado).

5.2.4 Autoclave

A moldação em autoclave reside na consolidação de componentes pré-formas, através da aplicação simultânea de pressão, temperatura e vácuo. Neste caso foram curados em autoclave, os pré-impregnados e os compósitos moldados manualmente por resina de poliéster insaturado.

Aos pré-impregnados retirou-se o filme protetor e empilhou-se o pré-impregnado na sequência pretendida, após isto é colocado sobre estes uma placa de compactação, o conjunto é inserido num saco de vácuo e sujeito a um ciclo de pressão e temperatura.



Figura 33 Pré-impregnado após a refrigeração.

No caso dos compósitos com resina de poliéster insaturado é colocado sobre o molde um filme protetor, sobre este colocou-se o reforço (tecido ou manta) depois a matriz que é espalhada com a ajuda de um pincel e de rolos, repete-se este passo até se atingir a sequência desejada, após isto, os laminados são fechados num saco de vácuo.

Na Figura 34 está representado o fecho do saco de vácuo, após isso os laminados sofrem o ciclo de pressão e temperatura. Um Aquecimento até 130 °C durante 40min, estágio a essa temperatura durante 1hora e depois o arrefecimento.

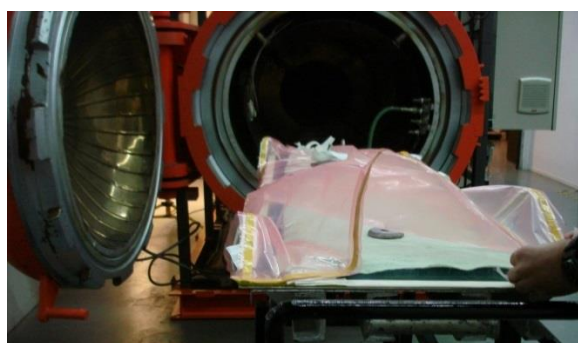


Figura 34 Saco de vácuo.

É esperado que as percentagens de fibra nos compósitos obtidos por este processo sejam superiores à obtida em moldação manual, uma vez que, as pressões exercida são maiores (este aumento de pressão leva à compactação dos laminados, contribuindo desse modo para uma melhor qualidade dos compósitos).

5.2.5 Preparação dos provetes

Na Tabela 9, está representada uma tabela resumo das placas produzidas para a extração dos provetes a ensaiar, onde está representado a orientação e tipo de reforço usado assim como a resina e o número de camadas.

Tabela 9 Descrição das placas quanto á orientação, tipo de reforço, processo de moldação, matriz polimérica usada e número de camadas.

Placa	Orientação	Reforço	Processo de moldação	Matriz polimérica	Número de camadas
JRAPP0101	-	Manta	Autoclave	Epóxido	1
JRAPP0102	-	Manta	Autoclave	Epóxido	1
JRAP0105	-	Manta	Autoclave	Poliéster	1
JRAP0106	-	Manta	Autoclave	Poliéster	1
JRMP0105	-	Manta	Moldação manual	Poliéster	1
JB45APP0601	[0,45,0] _s	"Plane weave"	Autoclave	Epóxido	6
JB45APP0602	[0,45,0] _s	"Plane weave"	Autoclave	Epóxido	6
JB45AP0605	[0,45,0] _s	"Plane weave"	Autoclave	Poliéster	6
JB45APP0606	[0,45,0] _s	"Plane weave"	Autoclave	Poliéster	6
JB45MP0605	[0,45,0] _s	"Plane weave"	Moldação manual	Poliéster	6
JB45MP0606	[0,45,0] _s	"Plane weave"	Moldação manual	Poliéster	6
JU0APP0601	[0,90,0] _s	"Plane weave"	Autoclave	Epóxido	6
JU0APP0602	[0,90,0] _s	"Plane weave"	Autoclave	Epóxido	6
JU0AP0605	[0,90,0] _s	"Plane weave"	Autoclave	Poliéster	6
JU0APP0606	[0,90,0] _s	"Plane weave"	Autoclave	Poliéster	6
JU0MP0605	[0,90,0] _s	"Plane weave"	Moldação manual	Poliéster	6
JU0MP0606	[0,90,0] _s	"Plane weave"	Moldação manual	Poliéster	6

Os provetes foram extraídos das placas referidas na Tabela 9, com as dimensões das normas usadas no presente trabalho, para isso usou-se a máquina de corte com disco diamantado e refrigerada a água. Este método de corte pode degradar os provetes, uma vez que nos bordos do provete as fibras vão estar em contacto com a água.



Figura 35 Máquina de corte com disco diamantado.

No caso dos provetes para os ensaios de tração foram colocados tabs de alumínio nas extremidades, para diminuir a concentração de tensões sentida na zona de aperto. Para que a rotura ocorra numa zona central do provete. Inicialmente, pensou-se em usar tabs com materiais compósitos, contudo, com este método a rotura ocorria na zona do tabs, ver Figura 36, daí se optar pelos de alumínio.



Figura 36 Provette com tabs construídos com um material compósito.

Cortou-se tabs de alumínio com as dimensões $50 \times 25 \times 2$, estes foram lixados, assim como a zona do provete onde foram colados os tabs. Usou-se um adesivo epóxico estrutural (HB AS/AW 89) para a colagem.

A colagem deve ser cuidada para garantir o alinhamento correto em relação aos bordos do compósito, uma das formas para se garantir o alinhamento foi o uso de molas. Após a colagem dos tabs, os provetes foram sujeitos a uma pós-cura a 50°C durante 5 horas.



a)



b)

Figura 37 a) Tabs de alumínio e zona do provete a ser colado, b) fixação dos tabs durante a cura do adesivo epóxico estrutural.

6 Resultados experimentais

Na Tabela 10, estão representadas as dimensões e percentagem de volume de fibra existente em cada placa. Essa percentagem de volume foi calculada pela lei das misturas equação 44.

$$V_f = \frac{m_f \rho_m}{m_f \rho_m + m_m \rho_f} \quad 44$$

onde

m_f : massa do reforço após a secagem,

m_m : massa da matriz, $m_m = m_{\text{compósito}} - m_f$,

ρ_m : densidade da matriz, sendo que no caso da resina de poliéster insaturado toma o valor a 25°C=1,01 g/cm³ e no caso da resina epóxico toma o valor a 20°C =1,14 g/cm³

ρ_f : densidade da juta= 1.5 g/cm³.

Tabela 10 Dimensões das placas e quantidade de fibra.

Placa	Dimensões (C × L) [mm]	Espessura [mm]	Volume de fibra [%]
JRAPP0101	0,294 × 0,290	3,2	11,22
JRAPP0102	0,290 × 0,285	3,5	9,89
JRAP0105	0,296 × 0,295	3,6	5,17
JRAP0106	0,286 × 0,292	3,6	4,98
JRMP0105	0,299 × 0,303	4,3	3,69
JB45APP0601	0,277 × 0,284	4,0	29,54
JB45APP0602	0,278 × 0,282	4,3	25,73
JB45AP0605	0,300 × 0,297	4,5	23,19
JB45APP0606	0,295 × 0,289	4,6	24,26
JB45MP0605	---	---	---
JB45MP0606	0,305 × 0,302	4,9	22,38
JU0APP0601	0,284 × 0,286	4,4	27,09
JU0APP0602	0,294 × 0,287	4,4	24,93
JU0AP0605	0,300 × 0,290	4,4	24,65
JU0APP0606	0,297 × 0,297	4,7	22,46
JU0MP0605	0,296 × 0,296	4,4	22,67
JU0MP0606	0,305 × 0,306	4,9	22,34

Os dados da placa JB45MP0605 não foram retirados.

6.1 Ensaio à flexão

Os provetes ensaiados à flexão foram obtidos pela norma ASTM D 790 – 03. As dimensões dos provetes estão representadas na Figura 38.

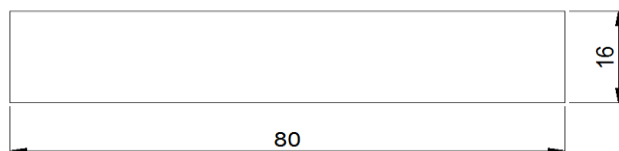


Figura 38 Esquema do formato dos provetes de flexão da norma ASTM D 790 – 03.

Os provetes foram ensaiados à flexão numa máquina com a designação TIRA modelo 2705 com uma velocidade de avanço da cabeça de 2mm/min. A célula de carga utilizada foi de 5 kN. O afastamento entre apoios foi de 68 mm. Os ensaios decorreram em ambiente normal de laboratório, a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa $50 \pm 5\%$.



Figura 39 Ensaio de flexão.

São necessários cinco provetes para que o teste seja válido, deste modo consegue-se minimizar o erro introduzido pela diferença de propriedades entre os vários pontos, uma vez que o material a ensaiar é anisotrópico.

6.1.1.1 Apresentação de resultados

Placa JRAPP0101: reforço está na forma de manta, moldado em autoclave, resina de epóxico e é constituída por uma camada de reforço.

Tabela 11 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JRAPP0101.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	4041	71,4	0,018	3,96
Desvio padrão [%]	6,3	8,2	6,2	9,8

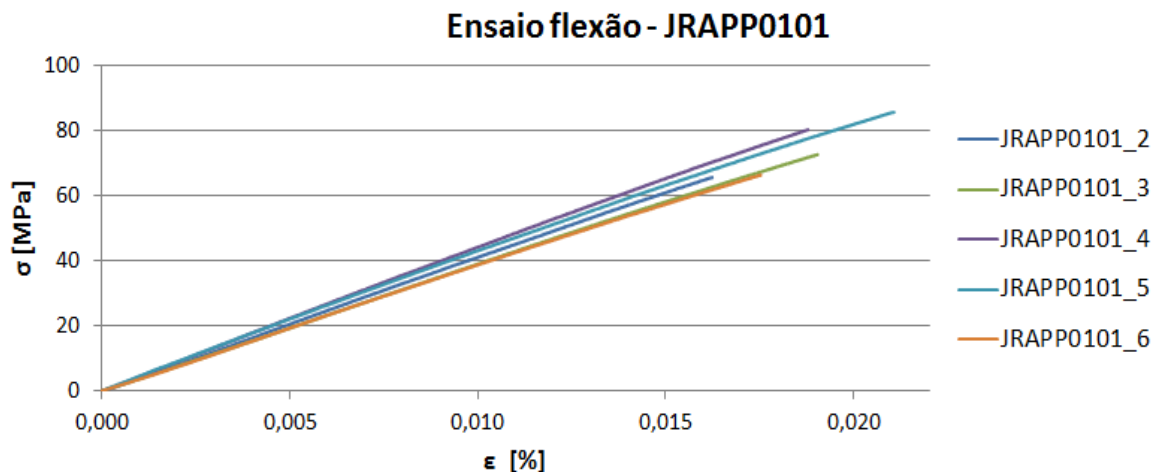


Gráfico 1 Ensaio de flexão da placa JRAPP0101.

Placa JRAP0105: reforço está na forma de manta, moldado em autoclave, resina poliéster insaturado e é constituída por uma camada de reforço.

Tabela 12 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JRAP0105

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	4332	35,4	0,009	2,25
Desvio padrão [%]	4,3	9,5	10,6	15,3

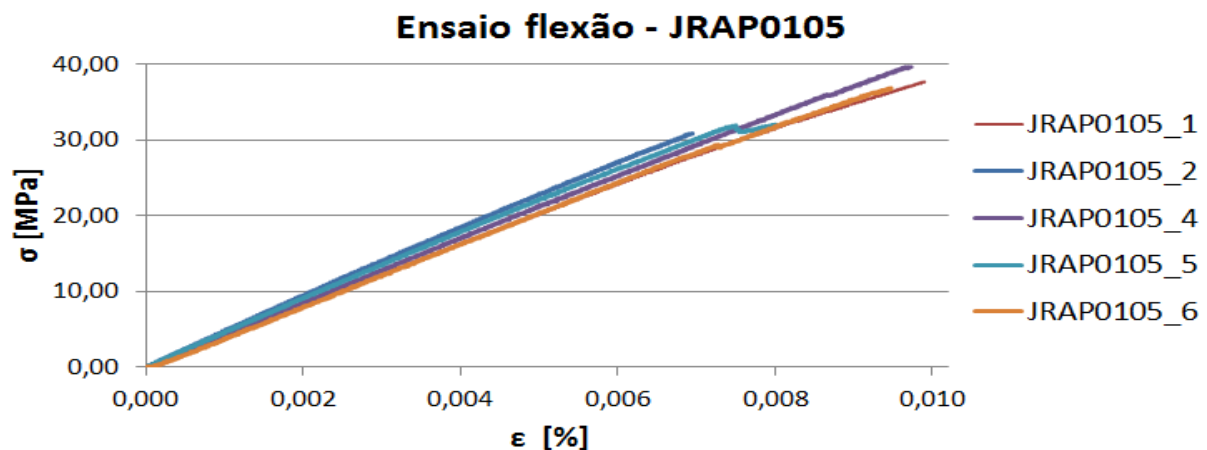


Gráfico 2 Ensaio de flexão da placa JRAP0105.

Placa JRMP0105: reforço está na forma de manta, moldado manual, resina poliéster insaturado e é constituída por uma camada de reforço.

Tabela 13 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JRMP0105.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	3922	37,6	0,010	1,66
Desvio padrão [%]	7,9	10,7	10,9	11,8

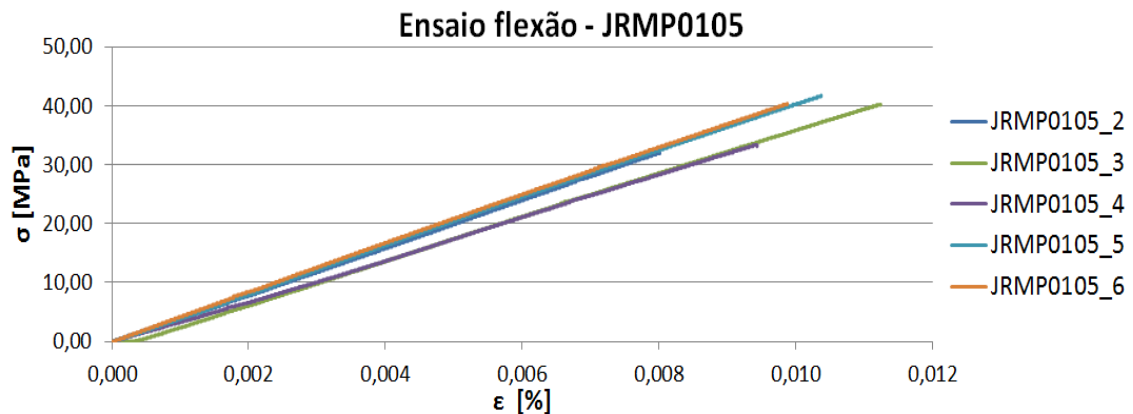


Gráfico 3 Ensaio de flexão da placa JRMP0105.

Placa JB45APP0601: reforço é constituído por tecido de juta, processo de fabrico para a obtenção do compósito foi autoclave, resina usada epóxico e é constituída por seis camadas de reforço com a seguinte orientação $[0,45,0]_s$.

Tabela 14 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JB45APP0601.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	5742	100,9	0,021	3,85
Desvio padrão [%]	6,6	1,3	5,8	5,9

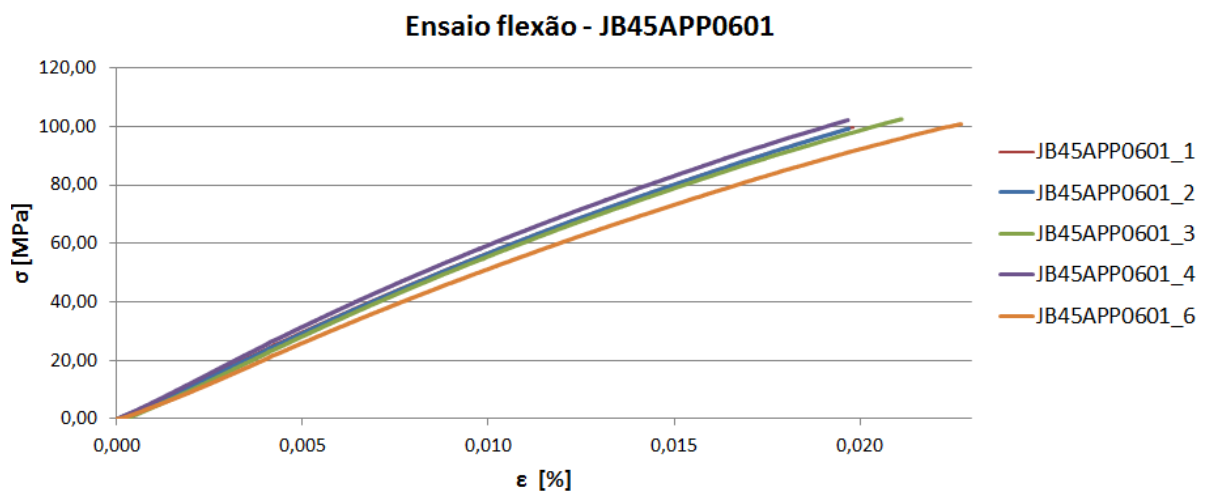


Gráfico 4 Ensaio de flexão da placa JB45APP0601.

Placa JB45AP0606: reforço é constituído por tecido de juta, processo de fabrico para a obtenção do compósito foi autoclave, resina usada poliéster insaturado e é constituída por seis camadas de reforço com a seguinte configuração $[0,45,0]_s$.

Tabela 15 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JB45AP0606.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	5709	79,3	0,019	3,13
Desvio padrão [%]	5,2	4,9	2,1	2,3

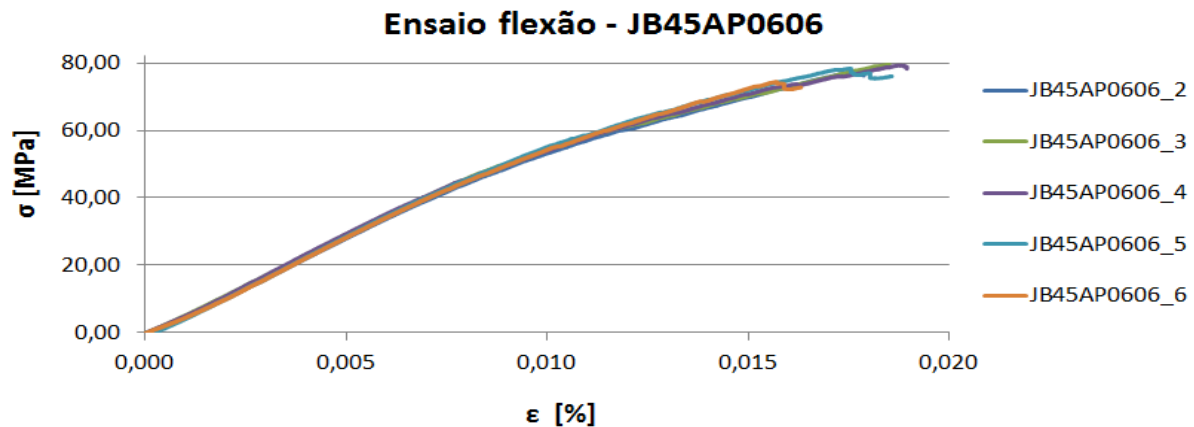


Gráfico 5 Ensaio de flexão da placa JB45AP0606.

Placa JB45MP0606: reforço é constituído por tecido de juta, processo de fabrico para a obtenção do compósito foi moldação manual, resina usada poliéster insaturado e é constituída por seis camadas de reforço com a seguinte configuração $[0,45,0]_s$.

Tabela 16 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JB45MP0606.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	4432	66,1	0,019	3,16
Desvio padrão [%]	4,4	5,8	4,6	3,8

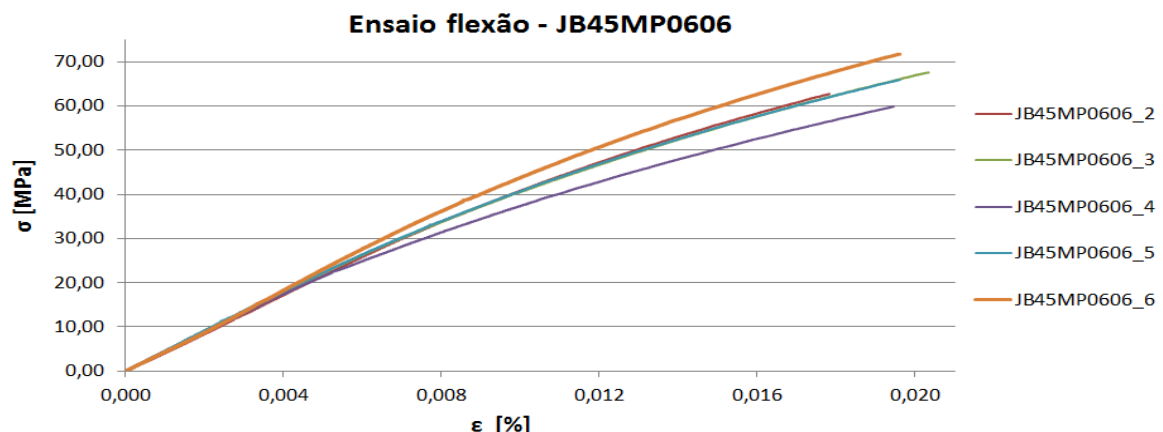


Gráfico 6 Ensaio de flexão da placa JB45MP0606.

Placa JU0APP0601: reforço é constituído por tecido de juta, processo de fabrico para a obtenção do compósito foi autoclave, resina usada epóxico e é constituída por seis camadas de reforço com a seguinte configuração $[0,90,0]_s$.

Tabela 17 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JU0AP0601.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	6674	93,1	0,016	2,84
Desvio padrão [%]	2,8	5,8	7,4	9,6

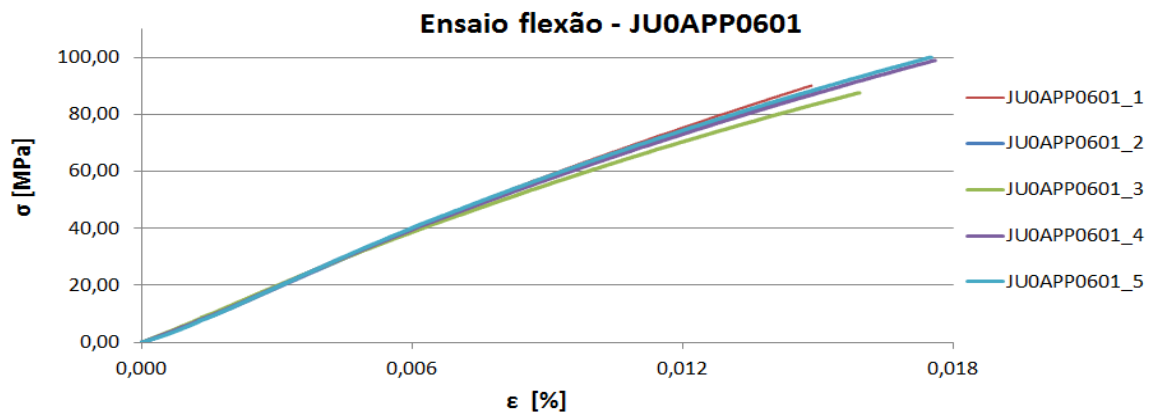


Gráfico 7 Ensaio de flexão da placa JU0APP0601.

Placa JU0AP0605: reforço é constituído por tecido de juta, processo de fabrico para a obtenção do compósito foi autoclave, resina usada poliéster insaturado e é constituída por seis camadas de reforço com a seguinte configuração $[0,90,0]_S$.

Tabela 18 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JU0AP0605.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	6485	90,1	0,018	3,26
Desvio padrão [%]	3,8	6,1	5,9	7,0

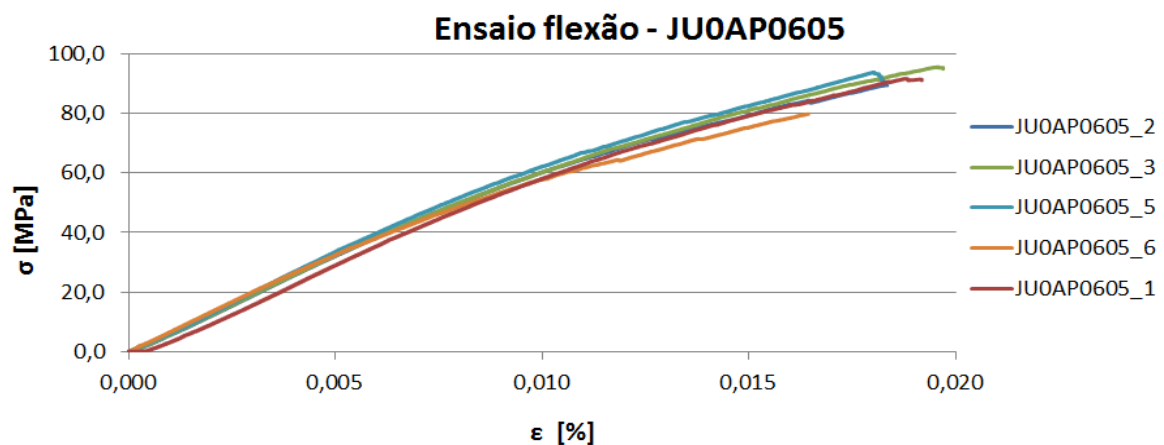


Gráfico 8 Ensaio de flexão da placa JU0AP0605.

Placa JU0MP0605: reforço é constituído por tecido de juta, processo de fabrico para a obtenção do compósito foi moldação manual, resina usada poliéster insaturado e é constituída por seis camadas de reforço com a seguinte configuração $[0,90,0]_S$.

Comportamento à mecânica da fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de juta

Tabela 19 Valores médios e desvios padrão obtidos pelo ensaio de flexão para a placa JU0AM0605.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\varepsilon_{\text{máx}}$ [%]	Deflexão [mm]
Média	5033	80,6	0,020	3,33
Desvio padrão [%]	3,0	3,7	10,2	11,1

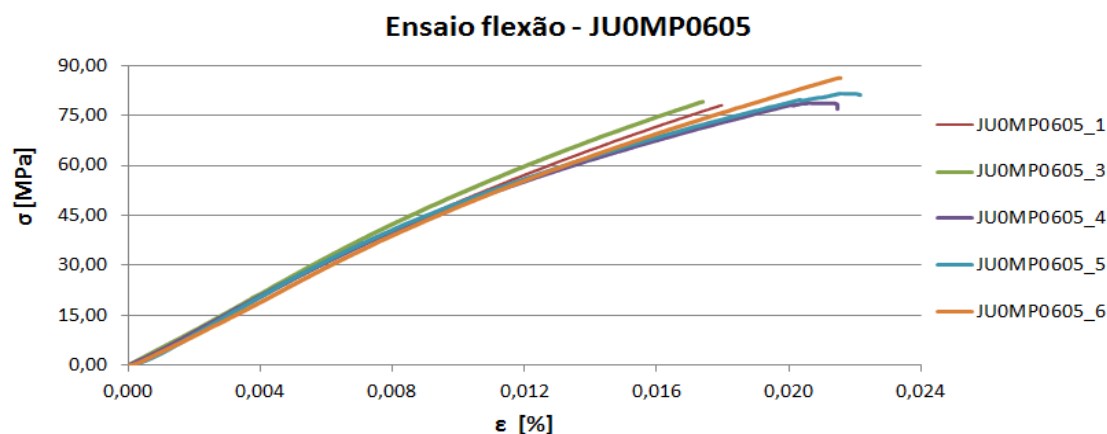


Gráfico 9 Ensaio de flexão da placa JU0MP0605.

Em baixo é apresentado uma tabela resumo dos valores obtidos no ensaio de flexão.

Tabela 20 Espessura média, quantidade de fibra, módulo de Young, tensão máxima e deformação média das placas ensaiadas à flexão.

Processo de Moldação	Resina	Reforço	B [mm]	Volume de fibra [%]	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\varepsilon_{\text{máx}}$ [%]
Autoclave	Epóxido	Manta	3,56	11,2	4041	71,4	0,018
	Poliéster insaturado	Manta	3,19	5,2	4332	35,4	0,009
Moldação manual	Poliéster insaturado	Manta	4,52	3,7	3922	37,6	0,010
Autoclave	Epóxido	[0,45,0] _s	4,12	29,5	5742	100,9	0,021
	Poliéster insaturado	[0,45,0] _s	4,59	24,3	5709	79,3	0,019
Moldação manual	Poliéster insaturado	[0,45,0] _s	4,73	22,9	4432	66,1	0,019
Autoclave	Epóxido	[0,90,0] _s	4,41	27,1	6674	93,1	0,016
	Poliéster insaturado	[0,90,0] _s	4,37	24,6	6485	90,1	0,018
Moldação manual	Poliéster insaturado	[0,90,0] _s	4,67	22,7	5033	80,8	0,020

6.1.1.2 Discussão de resultados

As placas moldadas por autoclave apresentam melhores valores de rigidez e resistência mecânica, assim como uma maior quantidade de fibra relativamente aos compósitos obtidos por moldação manual.

A moldação manual apresenta menor quantidade de fibra, o que conduz a uma menor resistência mecânica, uma vez que a fase reforço é a responsável por suportar a quase total da carga aplicada, é o facto destes compósitos estarem sujeitos a pressões e temperaturas baixas. Na moldação manual a temperatura de cura das placas é a sentida na sala onde foi produzido o compósito e a pressão exercida sobre estas placas é a pressão de aperto dos pares porcas parafusos. Para além disso a espessura destas placas não é uniforme em toda a sua superfície.

As placas moldadas por pré-impregnação têm valores superiores de rigidez e tensão máxima de flexão relativamente às moldadas em resina de poliéster.

As placas em que o reforço esta na forma de manta apresentam uma baixa quantidade de fibra, não distribuída uniformemente ao longo da superfície da placa, o que conduz a valores de rigidez, tensão máxima de flexão e deformação baixos, ou seja a carga é quase suportada pela matriz. A rotura destes provetes ocorreu sempre na zona onde existe menor quantidade de fibra.

As placas constituída por tecido com o empilhamento $[0,90,0]_s$ apresentam valores mais elevados de rigidez e tensão relativamente ao empilhamento $[0,45,0]_s$, a deformação do primeiro é inferior aos laminados com a $[0,45,0]_s$.

Como podemos observar pela placa JB45APP0601 (reforço na forma de tecido, com seis camadas orientadas a $[0,45,0]_s$, com resina de epóxico curado em autoclave), apresenta maior percentagem de fibra o que leva a ter uma melhor resistência mecânica, quando compara com a placa obtida pelo mesmo processo mas com o empilhamento a $[0,90,0]_s$ apresentando uma percentagem de fibra inferior.

O empilhamento a $[0,90,0]_s$, apresenta maior resistência mecânica à flexão e maior rigidez relativamente ao empilhamento $[0,45,0]_s$, este empilhamento apresenta um maior valor de deformação máxima.

6.2 Ensaio à tração

Os ensaios de tração foram realizados seguindo a norma ASTM D 3039/D 3039M. Todos os provetes foram sujeitos a um carregamento contínuo numa máquina de ensaios INSTRON modelo 4208 equipada com uma célula de 100kN, a velocidade do ensaio foi de 2mm/min. De cada ensaio obteve-se um registo da variação da força em função do deslocamento das amarras da máquina. Os ensaios decorreram em ambiente normal de laboratório, a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa $50 \pm 5\%$.

Na Figura 40, está representado as dimensões do provete segundo a norma ASTM D 3039/D 3039M.

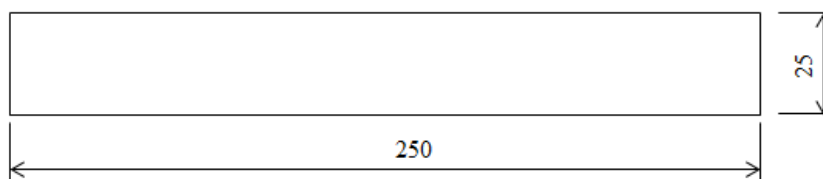


Figura 40 Esquema do formato dos provetes de tração da norma ASTM D 3039/D 3039M.

Tal como sucedeu nos ensaios de flexão, nos ensaios de tração também são necessários cinco provetes.

Dos cinco provetes a ensaiar à tração, dois deles foram instrumentados com extensómetros elétricos colados para obtenção do coeficiente de Poisson. Os restantes provetes foram ensaiados com um extensómetro de pinças da INSTRON 2630.111.

Usou-se dois extensómetros elétricos colados diferentes, um da RS e outro da HBM sendo a sua designação RS 632-168 N11-MA5-120-11 (usados nos provetes em que o reforço estava na forma de manta) e HBM 1-XY31-6/120, para os restantes. Na Figura 41 está representado um provete com os extensómetros HBM 1-XY31-6/120. A aquisição de dados foi feita através de um spider 8 a 5Hz.

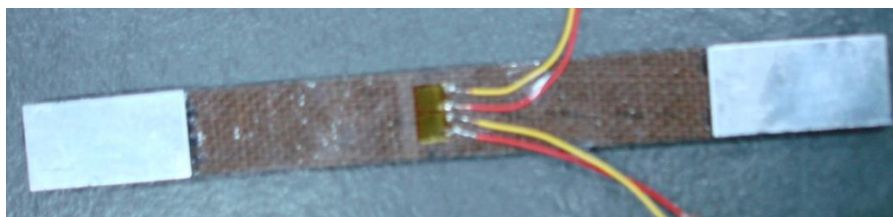


Figura 41 Provelte com extensómetros colados da HBM.



Figura 42 Provelte com extensómetro colado da RS

Tal como podemos observar pela Figura 41 e Figura 42, os extensómetros elétricos usados são diferentes. No caso, da HBM é uma roseta com dois extensómetros, uma grelha lê a deformação horizontal e outra para lê a deformação transversal, estes extensómetros tem uma área maior de leitura, enquanto os provetes que estão instrumentados com os extensómetros da RS, as leituras da deformação longitudinal e transversal é feita com dois extensómetros diferentes, para além disso estes extensómetros apresentam outras diferenças como o Gauge factor. Usou-se dois extensómetros elétricos colados diferentes, uma vez que no início deste projeto já existiam extensómetros da RS.

Para além dos extensómetros elétricos colados, também se usou um extensómetro de pinças, representado na Figura 43.

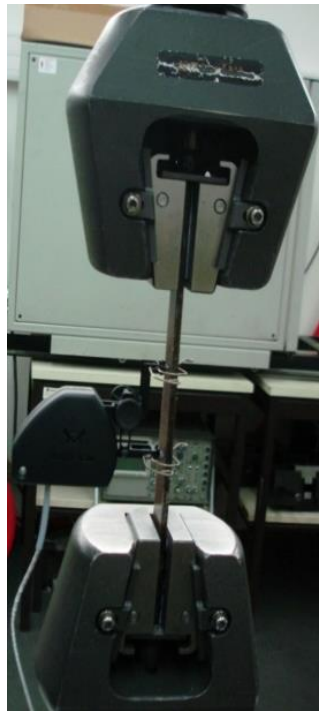


Figura 43 Extensômetro de pinças.

6.2.1 Apresentação de resultados

Nas tabelas abaixo vai-se apresentar os valores obtidos nos ensaios de tração com os extensômetros colados.

Placa JRAP0106 – uma camada de reforço na forma de manta, resina poliéster insaturado curado em autoclave.

Tabela 21 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JRAP0106.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	ν
Média	5791	13,9	0,36
Desvio padrão [%]	1,9	22,8	0,5

Placa JB45APP0602 - seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,45,0]_s$ com uma resina de epóxico curado em autoclave.

Tabela 22 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45APP0602.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	ν
Média	7164	53,9	0,30
Desvio padrão [%]	2,0	1,1	1,9

Placa JB45AP0605 - seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,45,0]_s$ com uma resina de poliéster insaturado curado em autoclave.

Tabela 23 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45AP0605.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	ν
Média	7382	36,8	0,32
Desvio padrão [%]	1,9	5,7	0,0

Placa JB45MP0606 - seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,45,0]_s$ com uma resina de poliéster insaturado processado por moldação manual.

Tabela 24 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45MP0606.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	ν
Média	6491	33,9	0,28
Desvio padrão [%]	4,7	1,1	9,1

Placa JU0APP0602 - seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,90,0]_s$ com uma resina de epóxido curado em autoclave.

Tabela 25 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JU0APP0602.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	ν
Média	7756	40,8	0,24
Desvio padrão [%]	9,9	0,2	6,5

Placa JU0AP0606 - seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,90,0]_s$ com uma resina de poliéster insaturado curado em autoclave.

Tabela 26 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JU0AP0606.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	ν
Média	8133	41,5	0,24
Desvio padrão [%]	8,1	2,2	10,1

Placa JU0MP0606 - seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,90,0]_s$ com uma resina de poliéster insaturado processado por moldação manual.

Tabela 27 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JU0MP0602.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	ν
Média	7423	36,5	0,26
Desvio padrão [%]	5,4	1,0	14,8

Nas tabelas abaixo vai-se representar os valores obtidos experimentalmente nos ensaios de tração, com o extensômetro de pinças, sendo que as duas primeiras tabelas

referem-se aos dados obtidos pelas placas constituídas com reforço na forma de manta e as restantes com o reforço na forma de tecido.

Placa JRAPP0102 – uma camada de reforço na forma de manata, com uma resina de epóxico curado em autoclave.

Tabela 28 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JRAPP0102.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]
Média	4687	38,4	$1,17 \times 10^{-2}$
Desvio padrão [%]	5,4	7,4	13,0

Ensaio tração - JRAPP0102

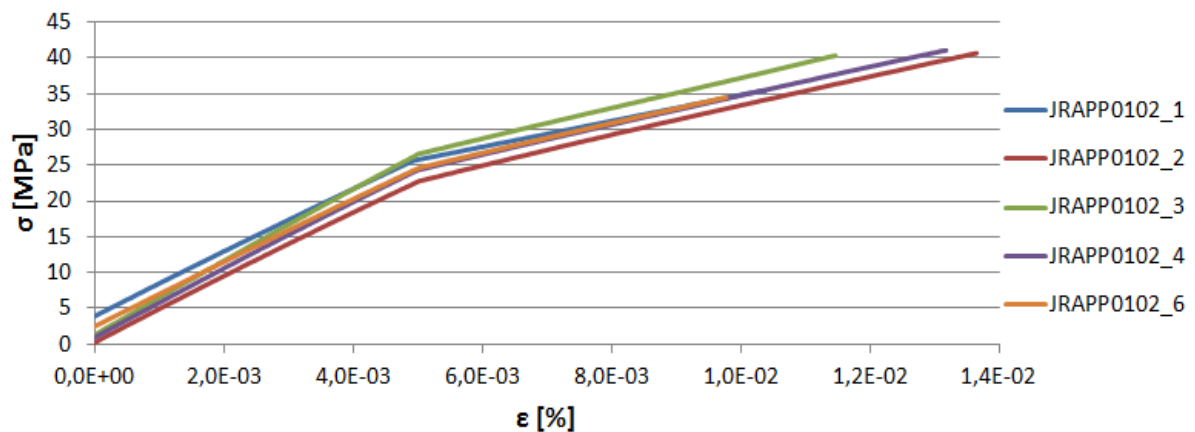


Gráfico 10 Representação tensão deformação da placa JRAPP0102.

Placa JRAP0102 - uma camada de reforço na forma de manata, com uma resina de poliéster insaturado curado em autoclave.

Tabela 29 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JRAP0102.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]
Média	4815	15,7	$2,98 \times 10^{-3}$
Desvio padrão [%]	3,2	7,9	8,5

Ensaio tração - JRAP0106

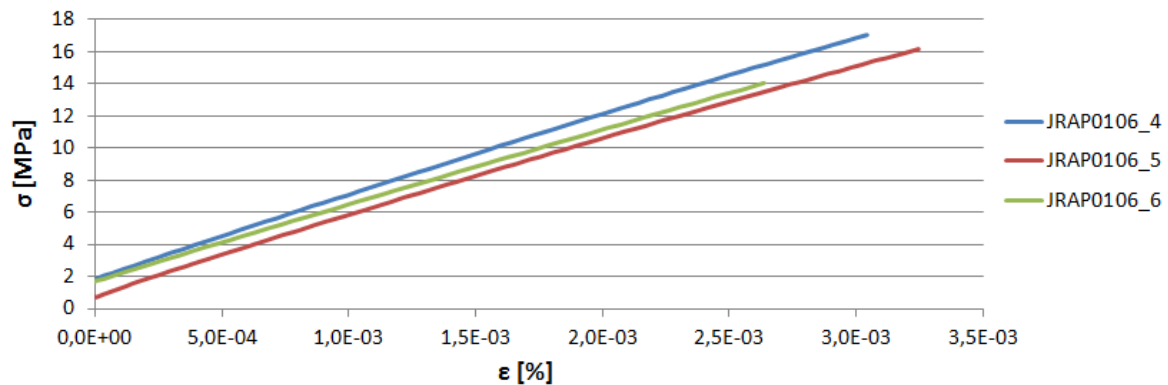


Gráfico 11 Representação tensão deformação da placa JRAP0102.

Placa JB45APP0602- seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,45,0]_s$ com uma resina de epóxico curado em autoclave.

Tabela 30 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45APP0602.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]
Média	7167	56,0	$1,31 \times 10^{-2}$
Desvio padrão [%]	1,7	1,9	3,2

Ensaio tração - JB45APP0602

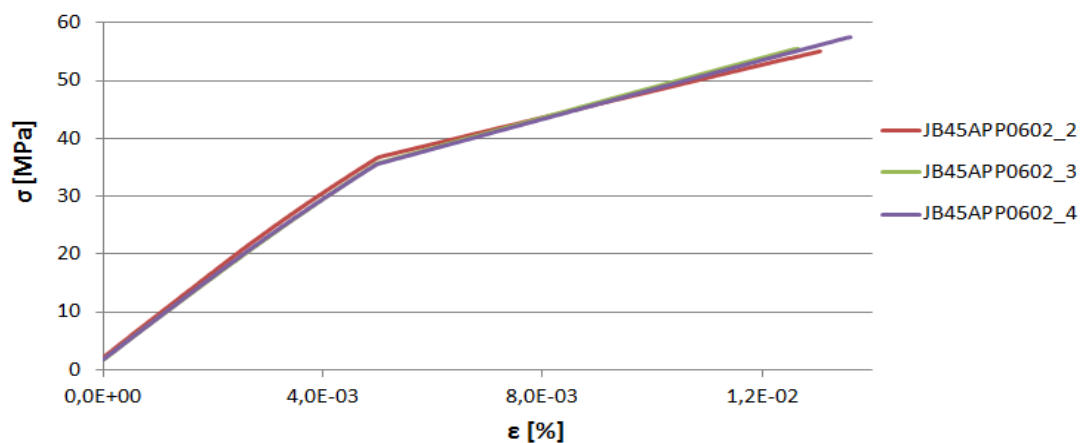
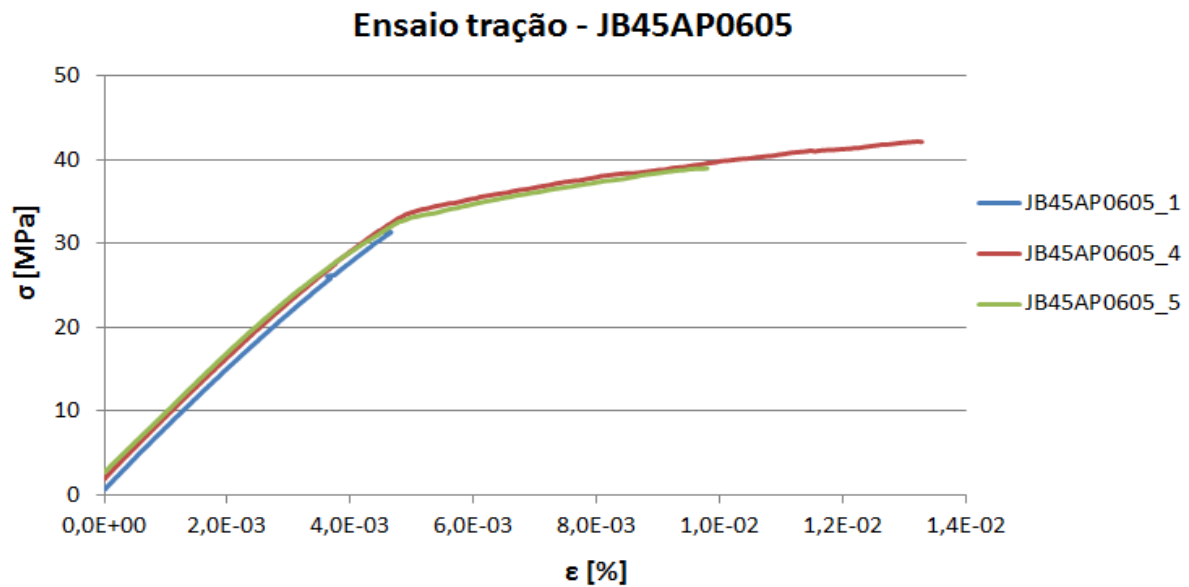


Gráfico 12 Representação tensão deformação da placa JB45APP0602.

Placa JB45AP0605 seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,45,0]_s$ com uma resina de poliéster insaturado curado em autoclave.

Tabela 31 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45AP0605.

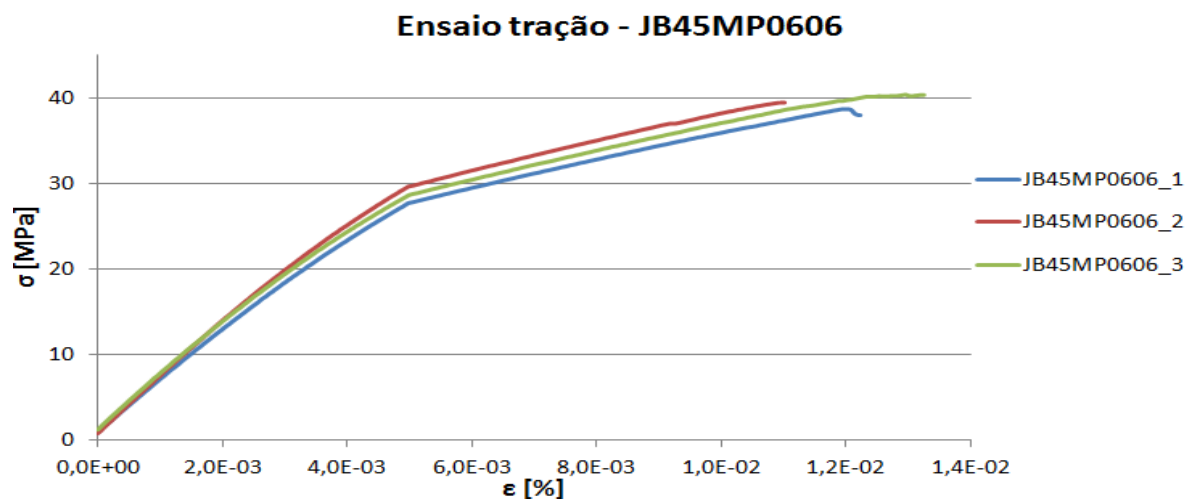
Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]
Média	7022	40,6	$1,15 \times 10^{-2}$
Desvio padrão [%]	0,4	3,2	12,4



Placa JB45MP0606 seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,45,0]_s$ com uma resina de poliéster insaturado processado por moldação manual.

Tabela 32 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JB45MP0606.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]
Média	6096	39,5	$1,22 \times 10^{-2}$
Desvio padrão [%]	3,7	1,7	7,51



Placa JU0APP0602 seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,90,0]_s$ com uma resina de epóxico curado em autoclave.

Tabela 33 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JUOAPP0602.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\varepsilon_{\text{máx}}$ [%]
Média	7448	50,8	$1,04 \times 10^{-2}$
Desvio padrão [%]	3,0	4,8	3,6

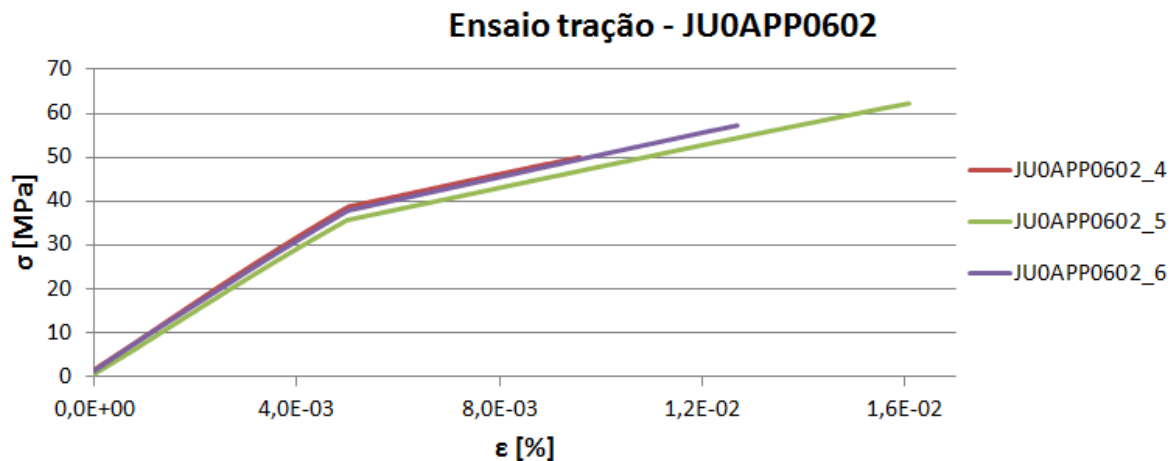


Gráfico 15 Representação tensão deformação da placa JUOAPP0602.

Placa JUOAP0606 - seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,90,0]_s$ com uma resina de poliéster insaturado curado em autoclave.

Tabela 34 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JUOAP0606.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\varepsilon_{\text{máx}}$ [%]
Média	7233	40,6	$1,15 \times 10^{-2}$
Desvio padrão [%]	1,7	2,4	6,2

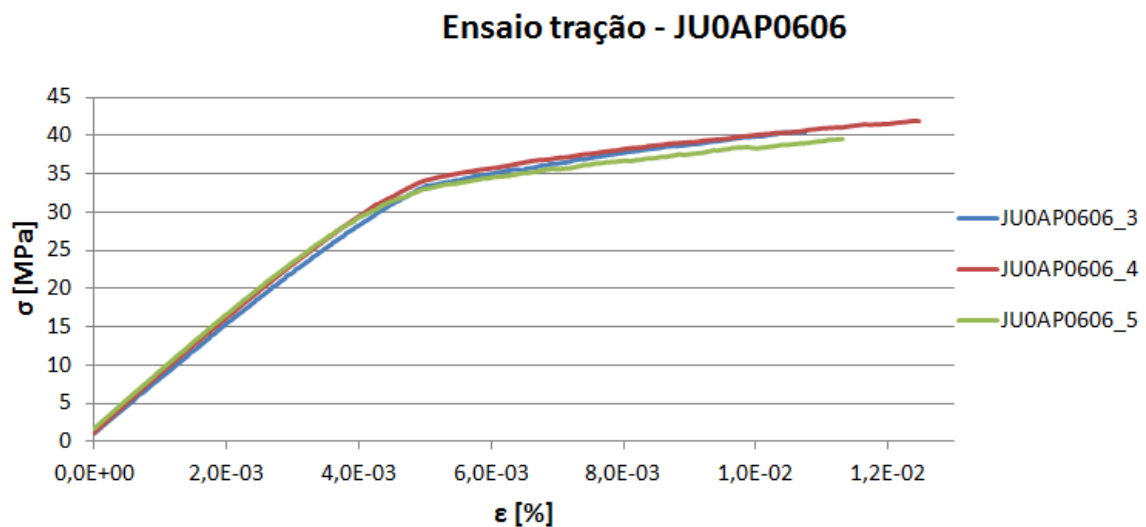


Gráfico 16 Representação tensão deformação da placa JUOAP0606.

Placa JU0MP0606 - seis camadas de reforço na forma de tecido, com a orientação $[0,90,0]_s$ com uma resina de poliéster insaturado processado por moldação manual.

Tabela 35 Média e desvio padrão das propriedades mecânicas dos ensaios à tração da placa JU0MP0606.

Propriedades mecânicas	E [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]
Média	6535	42,8	$1,20 \times 10^{-2}$
Desvio padrão [%]	2,6	1,5	3,2

Ensaio tração - JU0MP0606

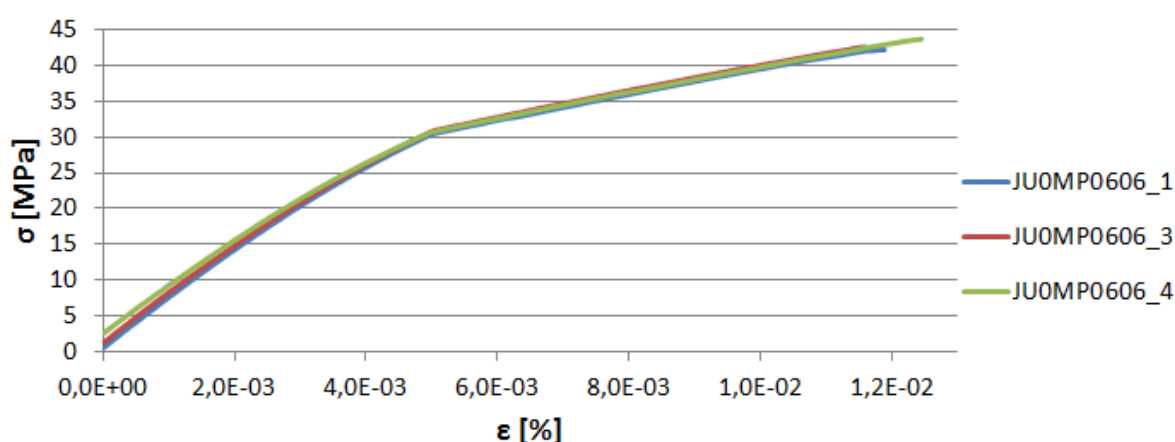


Gráfico 17 Representação tensão deformação da placa JU0MP0606.

Tabela 36 Valores médios dos resultados obtidos no ensaio de tração.

Processo moldação	Resina	Reforço	B [mm]	Volume de fibra [%]	E [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	v
Autoclave	Epóxido	Manta	4,27	9,9	4687	38,4	0,0117	---
	Poliéster insaturado	Manta	3,35	5,0	4815	16,1	0,0298	0,36
Autoclave	Epóxido	$[0,45,0]_s$	4,61	25,7	7167	56,1	0,0131	0,30
	Poliéster insaturado	$[0,45,0]_s$	4,65	23,2	7022	40,6	0,0115	0,32
Moldação manual	Poliéster insaturado	$[0,45,0]_s$	5,29	22,4	6096	39,5	0,0122	0,28
Autoclave	Epóxido	$[0,90,0]_s$	4,84	24,9	7448	56,6	0,0104	0,24
	Poliéster insaturado	$[0,90,0]_s$	4,77	24,5	7233	40,7	0,0115	0,24
Moldação manual	Poliéster insaturado	$[0,90,0]_s$	5,13	22,3	6535	42,8	0,0120	0,26

Para o cálculo do valor médio da rigidez e tensão máxima, só foram considerados os ensaios obtidos com o extensômetro de pinças. Por se observar uma grande diferença entre os

valores obtidos pelo extensômetro de pinças e os colados, por exemplo no compósito JU0AP0606, o valor médio do módulo de Young no caso dos extensômetros colado é de 81323 MPa, e no caso do valor médio com o extensômetro de pinças é de 7233 MPa. Um dos motivos da diferença destes valores é devido ao extensômetro colado que faz a leitura da deformação longitudinal deixarem de ler para deformações superiores a $2,5 \times 10^{-3} \%$ motivado por uma má definição dos parâmetros de calibração de leitura dos extensômetros no sistema de aquisição de dados usado.

6.2.2 Discussão de resultados

Tal como foi referido anteriormente, os valores médios do módulo de Young e tensão máxima de tração só foi tido em conta os valores obtidos pelo extensômetro de pinças, pelo facto do valor da deformação longitudinal nos extensômetros colados saturar para deformações superiores a $2,5 \times 10^{-3} \text{ m}$. Uma má colagem do extensômetro ao provete, a danificação do extensômetro no ato da soldadura, a não utilização de extensômetros com terminais incorporados para evitar a soldadura de cabos e a não compensação dos cabos e da temperatura são alguns dos fatores que conduzem a um erro de leitura dos valores obtidos pelos extensômetros. Por este motivo só se usou os dados dos extensômetros colados para a obtenção do coeficiente de Poisson.

O compósito com maior valor de coeficiente de Poisson é o laminado reforçado com manta de juta. Estas placas são caracterizadas por uma baixa quantidade de fibra sendo constituídas maioritariamente por resina, portanto as suas propriedades são muito próximas das da resina, como podemos ver pelo valor do coeficiente de Poisson da resina que é $\nu = 0,4$ e o valor da placa JRAP0106 é $\nu = 0,36$.

Nas placas reforçadas com tecido, os laminados com a orientação $[0,45,0]_s$ tomam valores do coeficiente de Poisson superiores relativamente aos laminados com orientação $[0,90,0]_s$, como podemos ver pelas Tabela 22, Tabela 24, Tabela 26 e Tabela 27. Os laminado a $[0,45,0]_s$ oferecem uma maior resistência à mudança de volume do compósito, do que os laminados a $[0,90,0]_s$. Sendo verificado o maior valor de coeficiente de Poisson para o laminado a $[0,45,0]_s$ com resina de poliéster insaturado, cujo o valor é $\nu = 0,32$.

Os compósitos obtidos por resina de poliéster insaturado apresentam maior valor de coeficiente de Poisson do que os obtidos por pré-impregnação.

Devido a um descuido no ato da soldadura num dos provetes da placa JUAP0606, um dos extensômetros colados foi danificado, usando-se um extensômetro da RS para fazer a leitura na secção longitudinal. Esta solução levou a uma discrepância dos valores do coeficiente de Poisson obtido nessa placa, sendo o valor obtido no provete com os extensômetro da HBM e outro da RS igual a $\nu=0,22$ e no provete obtido pelo par de extensômetros da HBM $\nu=0,28$.

O desalinhamento do reforço, a baixa quantidade de fibra, a elevada quantidade de vazios e o defeituoso acabamento superficial das placas obtidas por moldação manual, são algumas das razões para que estas tenham elevados valores do desvio padrão e baixas características mecânicas.

Os laminados com orientação $[0,90,0]_s$ têm valores superiores de rigidez e tensão relativamente aos laminados com orientação $[0,45,0]_s$, uma vez que a carga aplicada está na direção da orientação do laminado oferecendo deste modo uma maior resistência.

Os valores das tensões máximas para os laminados a $[0,90,0]_s$ e a $[0,45,0]_s$ tomam valores próximos para os mesmos modos de obtenção do compósito e matriz usada. A mais-valia dos primeiros laminados relativamente aos segundos, é o valor de rigidez que é superior, contudo os valores da deformação são inferiores para o caso do laminados a $[0,90,0]_s$.

O modo de rotura dos provetes ocorreu na sua maioria nos topos, ver Figura 42, este tipo de rotura tem a designação segundo a norma usada de LAT (*L- lateral, A- at grip, T – top*), nos provetes de poliéster insaturado com a sequência do laminado $[0,45,0]_s$ a rotura ocorreu no meio do provete, designando-se por LGM (*L- lateral, G- gage, M – middle*). Cada uma dessas letras corresponde ao tipo de rotura, área onde ocorre e o local, respectivamente. Apesar da rotura nem sempre ocorrer no centro do provete, os valores médios assumidos para caracterizar estes ensaios podem ser validos, uma vez que os valores das tensões são muito próximos uns dos outros.

Um dos fatores que levou, a rotura a ocorrer nos topos dos provetes é causada por uma não homogeneização da espessura da placa ao longo da sua área. Ou seja junto das zonas de aperto a espessura é menor, portanto nos topos dos provetes a espessura é menor ocorrendo nesse local a tensão máxima.

Verificou-se um aumento de rigidez e uma redução da resistência mecânica e da deformação máxima para a tração relativamente aos ensaios de flexão, o que conduz a um comportamento elástico mais reduzido.

6.3 Ensaio à tenacidade

Os ensaios de tenacidade à fratura em modo I (K_{Ic}) foram realizados segundo a norma ASTM D5045-99, utilizando um provete do tipo CT (*compact tension*) e um provete do tipo SENB (*Single edge notch bend*).

6.3.1 Apresentação de resultados para os provetes CT

Todos os provetes foram sujeitos a um carregamento contínuo numa máquina de ensaios TIRA modelo 2705 equipada com uma célula de 5kN e uma velocidade de ensaio de 10mm/min, à exceção do provete JU0AP0606_1 (compósito reforçado com tecido bidirecional com a orientação a $[0,90,0]_s$, com uma resina de poliéster insaturado curado em autoclave) onde se fez-se com uma velocidade de ensaio de 1mm/min.

De cada ensaio obteve-se um registo variação da carga em função do deslocamento das amarras da máquina. Para a realização deste ensaio usou-se uma máquina de filmar, um espelho e um relógio, como podemos observa na Figura 27, desta forma é possível determinar o instante para o qual ocorre a carga máxima e se dá a rotura do provete. Os ensaios

decorreram em ambiente normal de laboratório, a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa $50 \pm 5\%$. Para a validação deste teste são necessários três ensaios.

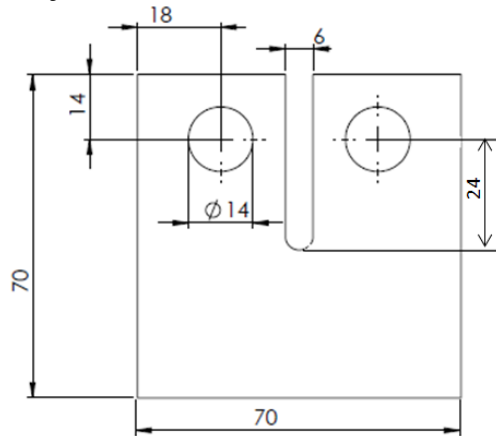


Figura 44 Representação de um provete CT sem a pré-fenda.

Na Figura 44, está representado as dimensões do provete. A pré-fenda fez-se através de um corte na raiz do entalhe utilizando uma lâmina de x-acto montada num sistema de guiamento desenhada e fabricada para este efeito, recorrendo-se ao auxílio de um torno.



Figura 45 Abertura da pré-fenda.

Na figura abaixo, é mostrado o esquema de montagem para se observar o andamento da fenda nos dois lados do provete.



Figura 46 Esquema da montagem, para se observar a propagação da fenda.

Após a abertura da pré-fenda, é necessário verificar a equação:

$$0,45 < \frac{a}{W} < 0,55 \quad 82$$

para garantir o estado plano de deformação. O valor da pré-fenda é 1mm, sendo $a = 26,1$ mm e $W = 57,3$ mm, então a razão acima é igual a:

$$0,45 < \frac{a}{W} = 0,46 < 0,55 \quad 83$$

Através do Gráfico 18, tirou-se o valor da carga máxima P_{\max} e o valor da carga P_q , que é a interseção da reta AB' (5% da inclinação da reta AB).

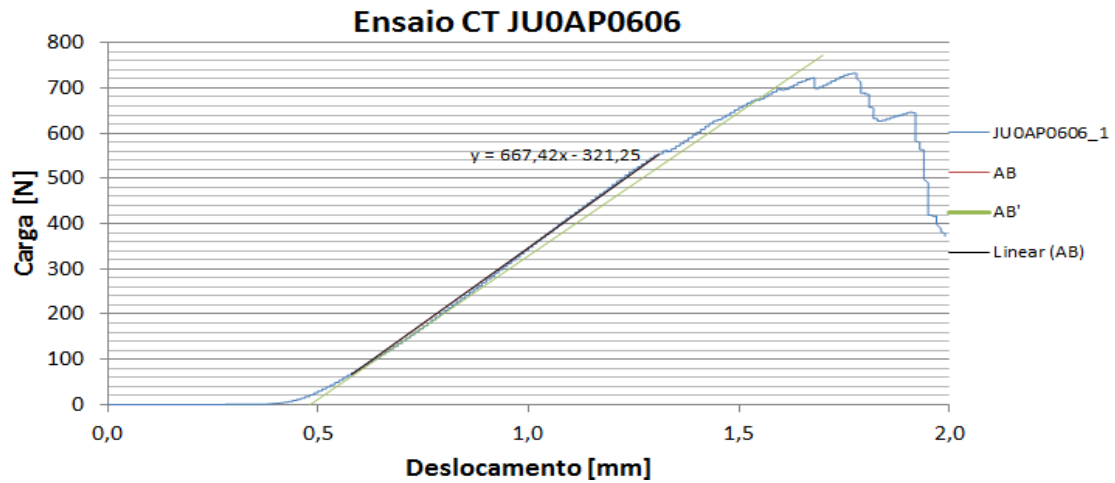


Gráfico 18 Representação da carga deslocamento de um ensaio CT.

A restrição da equação 83 é verificada para os valores de P_{\max} e P_q .

$$\frac{P_{\max}}{P_q} = \frac{0,73}{0,68} = 1,08 < 1,1 \quad 84$$

Após a verificação da equação 84, calculou-se o fator de intensidade de tensão provisório, K_q :

$$K_q = \frac{P_q}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) = 5,27 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \quad 85$$

Após a obtenção, de um valor provisório de fator de tensão é necessário verificar a equação 86 para que o valor provisório passe a representar o fator de intensidade de tensão K_{Ic} :

$$a, B, (w - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ced}} \right)^2 = 2,5 \left(\frac{5,27}{4,06} \right)^2 = 4,08 \quad 86$$

A equação 86 não é verificada.

$$a = 3,61 < 4,08 \quad 87$$

$$B = 0,45 < 4,08 \quad 88$$

$$w - a = 2,12 < 4,08 \quad 89$$

No caso de se verificar, $K_q = K_{Ic}$ a equação 86, a resistência á fratura é dado por:

$$G_{Ic} = \frac{(1 - \nu^2) K_{Ic}^2}{E} = \frac{(1 - 0,24^2) 5,27^2}{7233} = 3,62 \text{ kJ/m}^2 \quad 90$$

O cálculo acima foi realizado para o provete JU0AP0606_1 (seis camadas de reforço na forma de tecido, com resina de poliéster insaturado curado em autoclave). Em baixo vai-se, apresentar os valores médios de alguns parâmetros para obtenção do fator de intensidade de tensão e taxa de libertação de energia.



Figura 47 Modo para se obter o valor de “a” quando se atinge a carga máxima.

Tabela 37 Valores médios de alguns parâmetros para o cálculo do fator de intensidade de tensão das placas curadas em autoclave.

Valores médios	Autoclave				
	Epóxido		Poliéster insaturado		
	$[0,90,0]_s$	$[0,45,0]_s$	Manta	$[0,90,0]_s$	$[0,45,0]_s$
a [cm]	2,49	2,48	2,5	2,53	2,51
w [cm]	5,43	5,49	5,52	5,6	5,55
B [cm]	0,43	0,39	0,35	0,45	0,49
$0,45 < w/a < 0,55$	0,458	0,451	0,454	0,451	0,459
$(W - a)$ [cm]	2,94	3,01	3,02	3,07	2,96
f(x)	8,53	8,37	8,43	8,38	8,55
$P_{MÁX}$ [kN]	0,68	0,71	0,27	0,74	0,77
$P_{máx}/P_q$	1,03	1,01	1,04	1,06	1,02

Para os provetes obtidos por moldação manual:

Tabela 38 Valores médios de alguns parâmetros para o cálculo do fator de intensidade de tensão das placas obtidas por moldação manual.

Valores médios	Moldação manual	
	Poliéster insaturado	
	$[0,90,0]_s$	$[0,45,0]_s$
a [cm]	2,5	2,48
w [cm]	5,5	5,55
B [cm]	0,49	0,49
$0,45 < w/a < 0,55$	0,450	0,446
$(W - a)$ [cm]	3,05	3,08
f(x)	8,35	8,25
$P_{MÁX}$ [kN]	0,75	0,79
$P_{máx}/P_q$	1,02	1,01

Como podemos observar pela Tabela 37 e Tabela 38, os valores da restrição para garantir o estado plano de deformação ($0,45 < w/a < 0,55$) a razão está muito próxima do limite inferior. Apesar de não se verificarem as duas restrições, dadas pela equação 82 e 86, que garantem o estado plano de deformação e um valor reduzido para a zona plástica durante a propagação da fenda respectivamente, vai-se apresentar os valores médios para a resistência à fratura.

Para os compósitos curados em autoclave:

Tabela 39 Valores médios para a resistência à fratura, das placas obtidas por autoclave.

Valores médios	Autoclave				
	Epóxico		Poliéster insaturado		
	$[0,90,0]_s$	$[0,45,0]_s$	$[0,90,0]_s$	$[0,45,0]_s$	Manta
K_{Ic} [MPa. $m^{1/2}$]	5,3	6,5	5,5	6,1	2,7
Desvio Padrão [%]	1,9	5,6	2,8	9,9	12,1
$a, B, (W - a) > 2,5(K_q/\sigma_y)^2$	2,4	3,4	4,6	5,6	6,9
G_{Ic} [kJ/ m^2]	3,9	5,4	3,9	4,7	1,3
Desvio Padrão [%]	3,6	11,1	5,6	19,9	24,2

Para os compósitos moldados por moldação manual:

Tabela 40 Valores médios para a resistência à fratura, das placas obtidas por moldação manual.

Valores médios	Moldação manual	
	Poliéster Insaturado	
	$[0,90,0]_s$	$[0,45,0]_s$
K_{Ic} [MPa. $m^{1/2}$]	5,3	5,6
Desvio Padrão [%]	2,9	3,4
$a, B, (W - a) > 2,5(K_q/\sigma_y)^2$	3,9	5,0
G_{Ic} [kJ/ m^2]	4,0	4,7
Desvio Padrão [%]	5,9	6,8

6.3.1.1 Discussão de resultados

Como podemos verificar pelas Tabela 37 a Tabela 40, nenhum dos ensaios é válido, devido às dimensões dos provetes não serem as mais adequadas, para a espessura dos provetes apresentados.

Os compósitos obtidos por autoclave tem uma melhor resistência à fratura em modo I do que os obtidos por moldação manual.

Os pré-impregnados são caracterizados por apresentarem valores de fator de intensidade de tensão e taxa de libertação de energia superiores aos obtidos pela resina de poliéster insaturado.

Os compósitos que garantem o maior valor de fator de intensidade de tensão são os pré-impregnados com a orientação a $[0,45,0]_s$, onde o fator de intensidade de tensão crítico médio é de $6,5 \text{ MPa.m}^{1/2}$ e a taxa de libertação de energia crítica é $5,4 \text{ kJ/m}^2$. Sendo o compósito obtido por moldação manual com a orientação a $[0,90,0]_s$ com os menores valores de resistência à fratura em modo I.

Apesar dos compósitos constituídos por resina de epóxico, com a orientação do laminado a $[0,45,0]_s$, apresentarem valores mais elevados da resistência à mecânica da fratura em modo I, estes não verificam as três condições da equação, $a, B, (w - a) \geq 2,5 \left(\frac{k_{Ic}}{\sigma_{ced}} \right)^2$, sendo que o valor obtidos da parcela do lado direito é superior ao valor da fenda, da espessura e da diferença da comprimento, w , com a fenda, “ a ”, não é possível a verificação de um valor reduzido de tenacidade na frente da fenda o que pode conduzir a valores que não são reais.

O compósito obtida por pré-impregnação com o laminado a $[0,90,0]_s$, da segunda restrição só não é verificado o valor da espessura.

$$a, B, (w - a) \geq 2,5 \left(\frac{k_{Ic}}{\sigma_{ced}} \right)^2 = 2,5 \left(\frac{5,59}{5,66} \right)^2 = 2,44 \quad 91$$

A equação 91 não é verificada.

$$a = 2,49 > 2,44 \quad 92$$

$$B = 0,43 < 2,44 \quad 93$$

$$w - a = 2,94 > 2,44 \quad 94$$

Para além disso, este compósito apresenta o menor valor de w , ou seja, os provetes deviam ter dimensões mais reduzidas para estas espessuras.

6.3.2 Apresentação de resultados para os provetes SENB

Devido à impossibilidade da verificação dos ensaios à fratura em modo I com uma geometria de provete CT, usou-se provetes SENB. A validação com esta geometria é igual ao procedimento feito com o provete CT.

Todos os provetes foram sujeitos a um carregamento contínuo numa máquina de ensaios INSTRON modelo 4208 equipada com uma célula de 5kN e uma velocidade de ensaio de 10mm/min. De cada ensaio obteve-se um registo variação da carga em função do deslocamento das amarras da máquina.

As dimensões do provete foram determinadas através da razão $\frac{w}{B}=4$, dada pela norma usada.

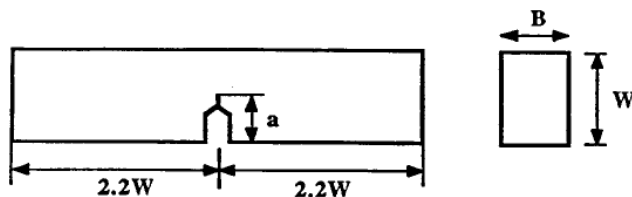


Figura 48 Dimensões do provete SENB.

Na Figura 49 está representada o ensaio há fratura em modo I para a caracterização da tenacidade.



Figura 49 Modo para se obter o valor de “a” quando se atinge a carga máxima para o provete SENB.

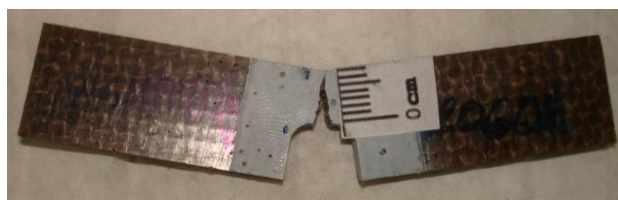


Figura 50 Provete SENB após o ensaio de fatura em modo I.

Na Figura 50 está representado o provete após o ensaio.

Para esta geometria só se usou compósitos curados em autoclave, nas tabelas abaixo vai-se apresentar os valores médios do fator de intensidade de tensão crítica e taxa de liberação de energia crítica.

Tabela 41 Valores médios de alguns parâmetros para a caracterização à fatura em modo I.

Valores médios	Autoclave		
	Epóxido		Poliéster insaturado
	[0,90,0] _s	[0,45,0] _s	[0,45,0] _s
a [cm]	0,9	0,9	0,9
w [cm]	1,8	1,62	1,58
B [cm]	0,43	0,39	0,46
$0,45 < w/a < 0,55$	0,498	0,556	0,571
(W – a)[cm]	0,91	0,72	0,68
f(x)	10,6	12,8	13,6
P _{MÁX} [kN]	0,23	0,20	0,19
P _{máx} /P _q	1,0	1,1	1,1
K _{Ic} [MPa. m ^{1/2}]	4,0	4,4	4,2
Desvio Padrão [%]	5,0	17,2	19,6
$a, B, (W - a) > 2,5(K_q/\sigma_y)^2$	1,26	1,92	2,76
G _{Ic} [kJ/m ²]	2,04	2,6	2,3
Desvio Padrão [%]	10,2	33,4	40,0

Através dos dados da Tabela 41 verificou-se que nenhum dos provetes verifica o estado plano de deformação pelo que os ensaios são considerados inválidos, tal como aconteceu com os provetes CT. A geometria do provete usada não é a mais adequada pelo que não é

verificado o estado plano de deformação nos compósitos, à exceção do compósito com a orientação $[0,90,0]_s$, contudo este não verifica a segunda restrição (equação 77). Verificou-se que os pré-impregnados apresentam uma maior resistência à tenacidade. Os laminados com a orientação $[0,45,0]_s$ apresentam maiores valor de fator de intensidade de tensão e taxa de libertação de energia.

7 Conclusões

Neste trabalho procedeu-se ao desenvolvimento de um material compósito, constituído por uma matriz polimérica reforçada com fibra de juta, tendo como objetivo caracterizar o seu comportamento à flexão, tração e mecânica da fratura em modo I.

Para a obtenção do material usou-se dois modos de moldação diferentes, a moldação manual e a moldação em autoclave.

As placas obtidas por autoclave apresentam propriedades superiores às obtidas por moldação manual. O processo de cura em autoclave criar um ambiente de vácuo inserido num ciclo de pressões e temperaturas bem definido, deste modo é extraído o ar, existe uma melhor compactação o que leva à extração da resina em excesso, este processo conduz a compósitos com maior teor de fibra, apresentando melhores propriedades mecânicas.

A moldação manual é um processo que depende da qualificação da mão-de-obra, o que faz com que haja placas com empilhamento desalinhado. As placas obtidas por este método são heterogêneas, devido à impossibilidade da extração das bolhas de ar e vazios interiores, apresentam variação de aderência entre camadas e uma espessura de placa não uniforme, o que conduz a uma distribuição heterogênea de fibra em toda a área da placa. Estes compósitos são caracterizados por apresentar valores das propriedades mecânicas muito inferiores relativamente aos compósitos curados em autoclave.

As placas com maior teor de fibra apresentam melhores propriedades mecânicas. Contudo deve existir equilíbrio fibra/matriz para otimizar os valores da rigidez, tensão máxima e deformação máxima. Placas com pouca quantidade de fibra tem valores de tensão máxima reduzidos, isto devido à falta de reforço que é a responsável por suportar a quase totalidade da carga aplicada. Contudo se existir uma grande quantidade de matriz a distribuição da carga ao reforço não será correta.

Existe sempre um ganho nos valores de rigidez e tensão máxima dos compósitos moldados por autoclave com pré-impregnados relativamente aos compósitos moldados por autoclave com resina de poliéster insaturado.

Os pré-impregnados com a orientação do laminado a $[0,90,0]_s$, apresentam maior resistência à flexão e tração assim como maior rigidez de flexão e tração, a sua deformação é mais reduzida relativamente aos laminados $[0,45,0]_s$.

Na Tabela 42, vai-se apresentar os valores médios da tensão máxima, módulo de Young e deformação máxima para as solicitações de flexão e tração nos compósitos obtidos por pré-impregnação.

Tabela 42 Valores médios da tensão máxima, módulo de Young e deformação máxima para a solicitação de flexão e tração.

Orientação	Solicitação	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [MPa]	$\varepsilon_{\text{máx}}$ [%]
[0,90,0] _s	Flexão	93,1	6674,1	0,016
	Tração	56,6	7448	0,0104
[0,45,0] _s	Flexão	100,9	5741,9	0,021
	Tração	56,1	7167	0,0131

Apesar dos valores da tensões máximas dos laminados a [0,90,0]_s e [0,45,0]_s serem muito próximas, os valores da rigidez são superiores para os laminados a [0,90,0]_s (no caso da flexão existe um aumento de 932 MPa e na flexão 280MPa).

Os pré-impregnados com a orientação a [0,45,0]_s, apresentam uma maior resistência à tenacidade em modo I. Na Tabela 43, vai-se apresentar os valores médios obtidos nos ensaios de tenacidade á fratura em modo I para as placas obtidos pelos pré-impregnados.

Tabela 43 Valores médios do fator de intensidade de tensão crítico e taxa de libertação de energia crítica.

Orientação	K_{Ic} [MPa.m ^{1/2}]	G_{Ic} [kJ/m ²]
[0,45,0] _s	6,53	5,44
[0,90,0] _s	5,59	3,95

Os compósitos obtidos por poliéster insaturado com a orientação a [0,45,0]_s, apresentam maiores valores de coeficiente de Poisson.

Obteve-se os melhores resultados para os compósitos reforçados com o tecido bidirecional, com a resina de epóxico e curado em autoclave, a orientação das fibras a [0,90,0]_s trás sempre um aumento de rigidez relativamente aos laminados com a orientação a [0,45,0]_s, mas estes últimos apresentam uma maior resistência à mecânica da fratura em modo I. A moldação manual apresenta propriedades inferiores aos obtidos por autoclave. Os compósitos reforçados com a manta são caracterizados por apresentarem uma baixa quantidade de fibra, o que conduz a propriedades mecânicas baixas.

Dever-se-ia optar por outra geometria do provete para ensaiar à mecânica da fratura em modo I. Os ensaios com os provetes CT e SENB foram todos inválidos.

Devido ao tipo de tecido, no ato do corte dos provetes não é garantida a mesma quantidade de fibra em todos os provetes, para além disso ao cortar os provetes verificou-se um desalinhamento do tecido.

Devido aos diferentes diâmetros dos cordões de fibra de juta, conduz a resultados instáveis das propriedades mecânicas, mesmo que todos os outros fatores e condições de fabrico sejam as mesmas.

O desconhecimento dos tratamentos químicos a que foram sujeitas as fibras, pode conduzir a uma fraca aderência da fibra/matriz.

8 Trabalhos futuros

Como tópicos de trabalhos proponho

- Aplicação de tratamentos químicos às fibras. Deste modo melhora-se a capacidade de adesão com a matriz;
- Obtenção dos pré-impregnados de forma automático;
- Utilização de chanfros nos tabs para os provetes dos ensaios de tração;
- Utilização de outra geometria para a validação dos ensaios de tenacidade;
- Desenvolvimento de um modelo de simulação em Abaqus.

9 Referências

- [1] W. F. Smith, *Princípios de ciência e engenharia dos materiais* vol. 3.^a ed. Lisboa: McGraw Hill, 1998.
- [2] A. M. F. M. Ventura, "Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 21, pp. 10-19, 2009.
- [3] J. C. M. Cerqueira, "Monitorização do fluxo no processo de moldação por transferência de resina (RTM)," [s. n.], Porto, 2008.
- [4] M. F. S. F. d. Moura, A. B. d. Moraes, and A. G. d. Magalhães, *Materiais Compósitos Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2^a Edição ed., 2011.
- [5] A. M. Moreira, "Materiais Compósitos I," in *Área de construção*, ed. Instituto politécnico de tomar escola superior de tecnologia de tomar: Departamento de engenharia Civil, 2008/2009.
- [6] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D.-J. van Heerden, P. Kuiper, and H. de Wit, "Recycling of composite materials," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 51, pp. 53-68, 1// 2012.
- [7] B. T. Aström, *Manufacturing of polymer composites*. London [etc.]: Chapman & Hall, 1997.
- [8] I. M. Daniel and I. Ori, *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford: Oxford University Press, 1994.
- [9] C. M. N. Romão, "Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais," FEUP, Porto, 2003.
- [10] R. R. Franck, *Bast and other plant fibres*. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2005.
- [11] T. Munikenche Gowda, A. C. B. Naidu, and R. Chhaya, "Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, pp. 277-284, 3// 1999.
- [12] A. K. Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Progress in Polymer Science*, vol. 24, pp. 221-274, 5// 1999.
- [13] A. T. Afonso, "Desenvolvimento Sustentável em Engenharia Mecânica Um caso de estudo: Projeto Autarkeia," Feup, Porto, 2013.
- [14] <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/en/>. (Outubro 2013).
- [15] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, pp. 1552-1596, 11// 2012.
- [16] <http://en.wikipedia.org/wiki/Jute>. (Setembro de 2013).
- [17] K. D. Debiprasad Gon1, Palash Paul2, Subhankar Maity, "Jute Composites as Wood Substitute," *International Journal of Textile Science* 2012, 20120106 2012.
- [18] D. C. Bastos, "ESTUDO DA REDUÇÃO DA HIDROFILICIDADE DE FILMES BIODEGRADÁVEIS DE AMIDO DE MILHO TERMOPLÁSTICO COM E SEM REFORÇO DE FIBRA DE BANANEIRA ATRAVÉS DO TRATAMENTO POR PLASMA DE SF," Tese de Doutorado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- [19] E. N. Pires, "Efeito do tratamento de tuperfície em fibras de juta no compostamento mecânico de compósitos de matriz epóxi," Mestre em ciência e Engenharia de materiais, Unversidade Federal de Santa Catarina, 2009.

- [20] A. L. Giuseppe Cristaldi, Giuseppe Recca and Gianluca Cicala, "Composites Based on Natural Fibre Fabrics," *University of Catania – Department of Physical and Chemical Methodologies for Engineering*, pp. 1-27.
- [21] *Green composites polymer composites and the environment*. Boca Raton [etc.] Cambridge: CRC Press Woodhead Publishing, 2004.
- [22] A. A. P. d. I. d. M. e. d. Confecção, <<As>> *fibras têxteis características cuidados aplicações*. Porto: APIM.
- [23] "Technology update: prepregs," *Reinforced Plastics*, vol. 47, pp. 20-21, 6// 2003.
- [24] S. K. Mazumdar. (2002, Setembro, 2013). *Composites manufacturing: materials, product and process engineering*.
- [25] <http://www.flexidynamic.com/method.htm>. (Outubro de 2013).
- [26] G. M. Cândido, S. F. M. Almeida, and M. C. Rezende, "Processamento de laminados de compósitos poliméricos avançados com bordas moldadas," *Polímeros*, vol. 10, pp. 31-41, 2000.
- [27] K. F. Beim, "Estudo comparativo das tensões cisalhantes na interface entre camadas de um compósito polimérico de fibra de carbono pelos métodos numérico e experimental ", Autarquia associada à universidade de São Paulo, Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, 2008.
- [28] N. M. Filho, "Uma introdução a placas laminadas constituídas de materiais compostos em fibras longas," *Ci. Exatas/Tecnol., Londrina*, vol. 21, pp. 95-108, Dezembro 2000 2000.
- [29] J. P. A. Reina, A. T. Marques, J. F. D. Rodrigues, and M. F. d. S. F. d. Moura, *Influência das tensões interlaminares nas características modais de vibração de uma placa laminada compósita*.
- [30] J. N. Reddy, *Mechanics of laminated composite plates theory and analysis*. Boca Raton: CRC, 1997.
- [31] B. Harris, *Engineering composite materials*. London, 1999.
- [32] D. Gay, *Matériaux composites*. Paris: Hermes, 1987.
- [33] D. Gay, *Matériaux composites* vol. 3ème ed. revue et augmentée. Paris: Hermes, 1991.
- [34] S. C. R. Furtado, "Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo," Instituto Superior Técnico 2009.
- [35] R. V. d. Silva, "Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais ", Universidade de São Paulo, 2003.
- [36] C. A. G. d. M. Branco, A. A. Fernandes, and P. M. S. T. d. Castro, *Fadiga de estruturas soldadas* vol. 2ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [37] B. D. Agarwal and L. J. Broutman, *Analysis and performance of fiber composites* vol. 2nd ed. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 1990.
- [38] "ASTM D 5045 – 99 " in *Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials* ed: ASTM, 2007.
- [39] "E 300-90," in *Standart Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Material*ed: ASTM, 1997.
- [40] N. M. B. d. Almeida, *Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta*. Porto: [s. n.], 2012.

Anexos

Anexo A: Fichas técnicas das resinas

MR Dinis dos Santos, Lda
Rua António Peres Mendonça, 55
Casal do Marco * 2840-162 Selkai

FICHA TÉCNICA

AROPOL FS 6923

Página 1 de 2

A AROPOL FS 6923 é uma resina de poliéster insaturado, do tipo rígido, de média reactividade e baixa viscosidade caracterizada por ser pré-acelerada.

PROPRIEDADES TÍPICAS DA RESINA LÍQUIDA A 25°C

COR	Rosado
NÚMERO DE ACIDEZ	23
MONÓMERO	Estireno
CONTEÚDO DE MONÓMERO %	36
VISCOSIDADE – BROOKFIELD, cps	500
ESTABILIDADE (lugar escuro)	3 meses

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE CURA A 20°C

CATALIZADOR PMEK (50%), %	1,5
TEMPO DE GEL, MINUTOS	15
TEMPO DE GEL A TEMP*. MÁXIMA, MINUTOS	12
TEMPERATURA DE MÁXIMA, °C	170

PROPRIEDADES FÍSICAS DA RESINA CURADA

TEMPERATURA DISTORÇÃO °C	ASTM D – 648	72
RESISTÊNCIA À TRACÇÃO, KG/cm ²	ASTM D – 638	60
RESISTÊNCIA À FLEXÃO, KG/cm ²	ASTM D – 790	100
DUREZA BARCOL	ASTM D – 2583	45
ALONGAMENTO Á RUPTURA, %	ASTM D – 638	1,8

CARACTERÍSTICAS GERAIS:

A AROPOL FS 6923 é uma resina do tipo rígido, que se caracteriza por ter uma boa elasticidade, o que a torna ideal para a preparação de laminados que devam submeter-se a esforços mecânicos.

A óptima impregnação desta resina permite a perfeita união da mesma com os reforços normalmente utilizados nos plásticos reforçados, tais como MAT, Roving, Tecidos de Vidro, Carbono, etc. e também em combinação com cargas / pigmentos para revestimentos de superfícies. Se necessário, pode-se

JANEIRO 2008

MR Dinis dos Santos, Lda
Rua António Peres Mendonça, 55
Casal do Marco • 2840-162 Solxal

FICHA TÉCNICA

AROPOL FS 6923

Resina

Página 2 de 2

incorporar até 5% de estireno sem que as características mecânicas da resina sofram variações apreciáveis.
O endurecimento deve efectuar-se a frio por ter incorporado o acelerador. Para aplicações à temperatura ambiente, uma formulação orientativa pode ser a seguinte:

AROPOL FS 6923	100 p.p.
CATALIZADOR PMEK 50%	1 – 2 p.p.

Ao ser uma resina ortoftálica de características gerais, é de enorme versatilidade, sendo compatível com as outras resinas *AROPOL*, com os aditivos tixotrópicos que evitam o escorrimento em aplicações verticais e com os pigmentos inorgânicos normalmente empregues para estes tipos de resinas. Se a superfície das peças está exposta ao ar durante a sua preparação e endurecimento, é aconselhável a introdução na mistura de 0,04 a 0,08% de parafina. Com ela se consegue evitar a inibição das partes em contacto com o ar e assegurar um perfeito endurecimento.

APLICAÇÕES:

- AGRICULTURA: Silos, revestimento de máquinas, sistemas de rega, etc.
- AUTOMÓVEL: Carroçarias, pára-choques, furgões isotérmicos, etc.
- CONSTRUÇÃO: Marcos, painéis decorativos, mobiliário plástico, etc.
- ELÉCTRICA: Caixas de derivação, placas protectoras, encapsulados, etc.
- INDUSTRIAL: Depósitos, tubagens, peças de máquinas, etc.
- NÁUTICA: Barcos, lanchas, botes, etc.

ARMAZENAGEM:

Conservada em recipientes bem fechados e em lugares frescos, a resina é estável durante 3 meses.
A resina não deve estar exposta ao sol, nem a temperaturas elevadas, já que a sua estabilidade poderá ser notavelmente reduzida.

NOTA: Esta informação técnica é destinada a profissionais especializados que trabalham por sua conta e risco. As recomendações ou sugestões mencionadas nesta ficha técnica não constituem nenhuma garantia ou representação dos resultados. Recomendamos ensaios no seu laboratório previamente antes da sua utilização. A nossa responsabilidade por reclamações originadas por incumprimento de garantia, negligência ou qualquer outra razão está limitada ao preço de compra do produto.

JANEIRO 2008



SiPreg SR 121 / KTA 31x Epoxy systems for "In House" Prepregging

Systems for in house prepregging.

Low viscosity systems suitable for manual or mechanical impregnation of fabrics, filaments, braids, stitched reinforcements.

Suitable for filament winding.

90 °C maximum working temperature

Post curing can be between 80 °C up to 150 °C

Two component systems without solvent, without reactive diluent, with no toxic nor CMR components

The 2 components are stable in storage for at least one year

Store the prepregged fabrics away from humidity

Epoxy Resin SR 121

Aspect		Liquid
Color		Clear to light yellow
Color Gardner		2 maximum
Viscosity (mPa.s)	@ 15 °C	24 500 ± 3 000
Rheometer	@ 20 °C	9 800 ± 1 000
CP 50 mm	@ 25 °C	4 500 ± 800
Shear gradient	@ 30 °C	2 300 ± 400
10 s ⁻¹	@ 40 °C	750 ± 200
Dry Extract		100 %
Density :	@ 20 °C	1.176 ± 0.05
Picnometer		
NF EN ISO 2811-1		
Refraction Index		1.5760
Storage Stability :		24 month, does not cristalize

Hardeners KTA 31x

		KTA 317	KTA 315	KTA 313	KTA 311
Aspect / color:		Viscous liquid	Viscous liquid	Viscous liquid	Viscous liquid
Color		White	White	White	White
Reactivity		Very fast	Fast	Slow	Very slow
Dry extract		100 %			
Storage stability		Decants, thus mix before use Do not leave exposed to air, close container after use			
Viscosity (mPa.s)					
Rheomèter	@ 15 °C	16 000 ± 3 000	10 000 ± 2 000	11 000 ± 2 000	14 000 ± 3 000
CP 50 mm	@ 20 °C	12 000 ± 2 000	6 500 ± 1 000	7 700 ± 1 500	9 000 ± 2 000
Shear gradient 10 s ⁻¹	@ 25 °C	9 000 ± 1 500	4 800 ± 1 000	5 700 ± 1 000	6 800 ± 1 500
	@ 30 °C	7 500 ± 1 500	3 800 ± 800	4 500 ± 800	6 100 ± 1 000
	@ 40 °C	5 500 ± 1 000	2 800 ± 600	3 100 ± 600	5 500 ± 1 000
Density	@ 20 °C	1.07	1.13	1.13	1.13
Picnometer					
NF EN ISO 2811-1					

SICOMIN Composites

Tel : +33 (0)4 42 42 30 20

31, avenue. de la Lardièrre BP 23 13161 Châteauneuf-les-Martigues Cedex – France

Fax : +33 (0)4 42 81 29 29

E mail : composites@sicomin.com web : www.sicomin.com

Comportamento à mecânica da fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de juta



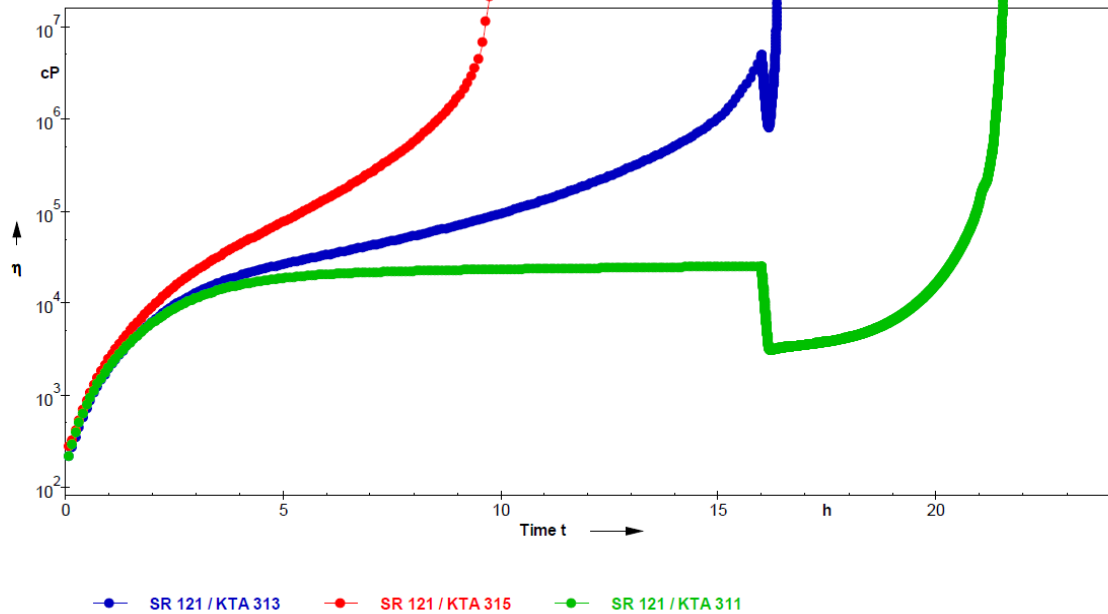
SR 121 KTA 31x
Page 2/6
Version du 17/01/2013

Mix SR 121 / KTA 31x

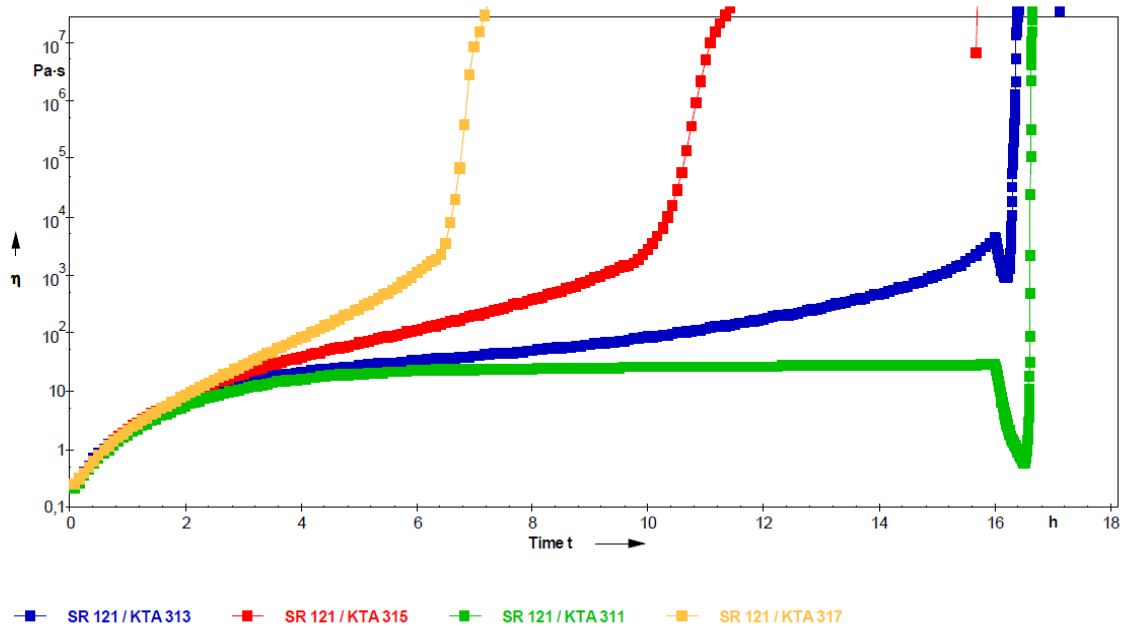
	SR 121 / KTA 317	SR 121 / KTA 315	SR 121 / KTA 313	SR 121 / KTA 311
Mixing ratio by weight			100 / 21	
Mixing ratio by volume	100 / 23	100 / 22	100 / 22	100 / 22
Initial Viscosity (mPa.s)				
Rheometer @ 20 °C	5 600	6 600	7 000	5 700
PP 50 mm @ 30 °C	1 800	2 200	2 300	3 400
Shear gradient @ 40 °C	780	1 000	1 000	1 000
Minimum ageing required before process	24 hrs @ 23 °C	24 hrs @ 23 °C	24 hrs @ 23 °C	48 hrs @ 23 °C or 16 hrs 40 °C
Storage stability of the prepregged fabrics				
@ -18 °C	6 months	6 months	1 year	1 year
@ 20 °C	7	15	60 days	> 60 days
@ 40 °C	2	5	10 days	> 20 days
Flow	None	None	Yes	Important



Viscosity evolution during 16 hours @ 60 °C, then cured @ 80°C

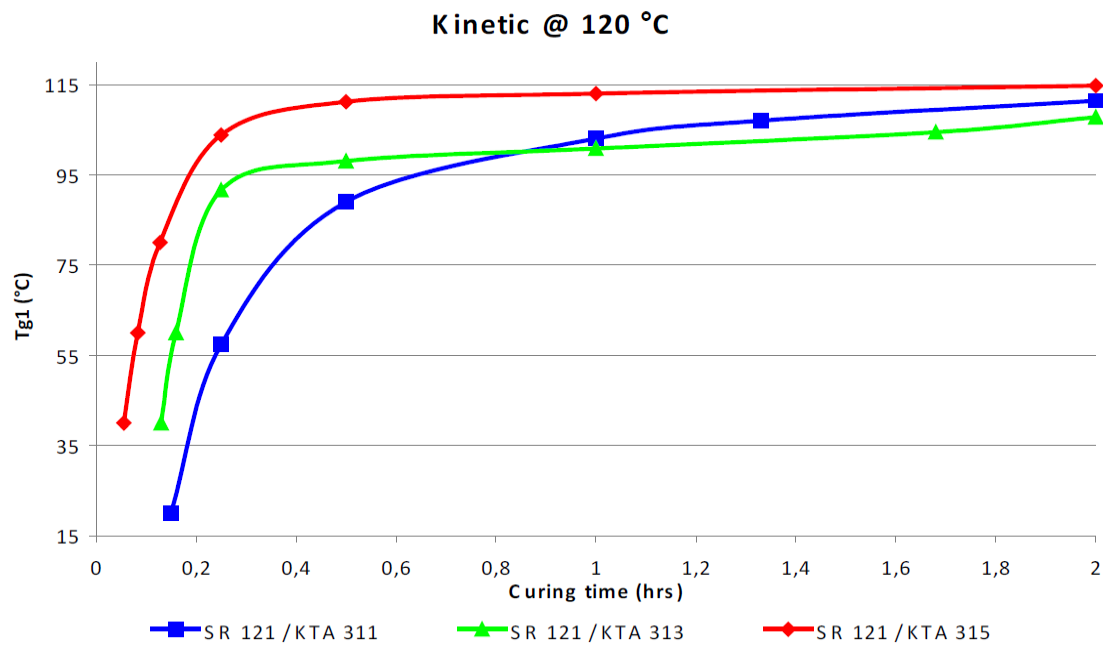
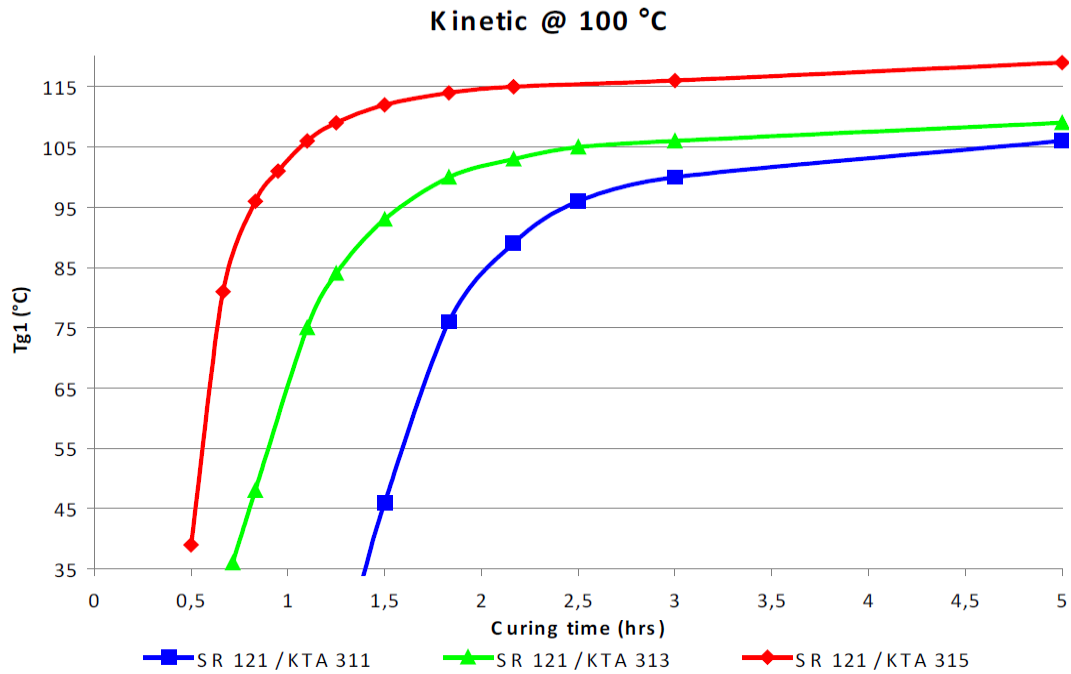


Viscosity evolution during 16 hours @ 60 °C, then cured @ 120°C



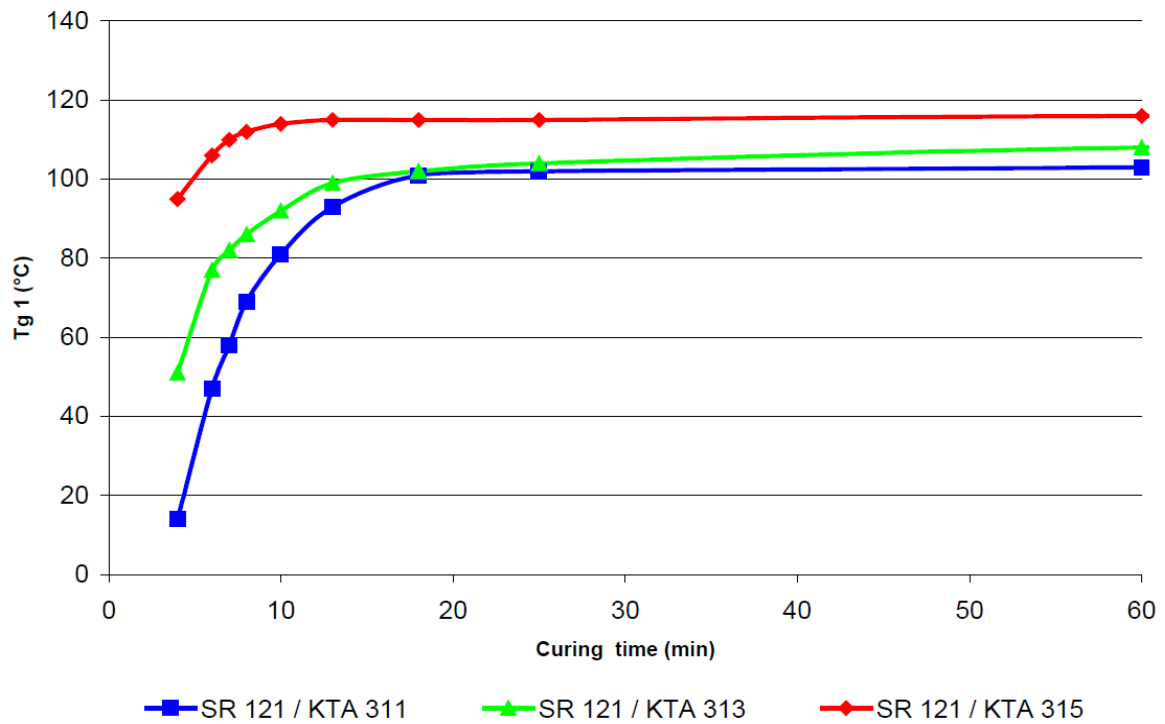


Kinetic : Evolution of Tg1 / onset @ 100 & 120 °C





Kinetic @ 130 °C



Curing time

	SR 121 / KTA 311	SR 121 / KTA 313	SR 121 / KTA 315
@ 100 °C	5 h	3 h 30 min	2 h
@ 120 °C	2 h	1 h 30 min	1 h
@ 130 °C	1 h	40 min	30 min

Comportamento à mecânica da fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de juta



Mechanical properties of pure epoxy (non reinforced) :

SR 121 KTA 31x
Page 6/6
Version du 17/01/2013

		SR 121 / KTA 315	SR 121 / KTA 313	SR 121 / KTA 311
Curing cycle		12h à 30°C + 4h à 60°C + 2h à 120°C	12h à 30°C + 4h à 60°C + 2h à 120°C	12h à 30°C + 4h à 60°C + 2h à 120°C
Traction				
Modulus	N/mm ²	3300	3700	3600
Maximum Resistance	N/mm ²	75	65	80
Breaking Strength	N/mm ²	72	65	80
Elongation at maximum load	%	3,5	2	2,8
Elongation at break	%	3,5	2	2,8
Flexion				
Modulus	N/mm ²	3300	3700	3500
Maximum Resistance	N/mm ²	129	152	153
Elongation at maximum load	%	5	5,8	5,9
Elongation at break	%	5,2	6,5	7,1
Choc Charpy				
Résilience	kJ/m ²	14	14	17
Transition vitreuse				
Tg1 / onset	°C	116	104	107
Tg1 max	°C	116	112	113

Essais réalisés sur des éprouvettes de résine pure coulée, sans dégazage préalable, entre des plaques en acier.

Mesures effectuées suivant les normes :

Traction : NF T51-034

Flexion : NF T51-001

Compression: NF T51-101

Choc Charpy: NF T51-501

Transition vitreuse: ISO 11357-2 : 1999 -5°C/180°C sous azote

Tg1 ou Onset : 1^{er} point à 20 °C/mn

Tg1 maximum ou Onset : deuxième passage

SICOMIN Composites

31, avenue. de la Lardière BP 23 13161 Châteauneuf-les-Martigues Cedex – France
Tel : +33 (0)4 42 42 30 20 Fax : +33 (0)4 42 81 29 29 E mail : composites@sicomin.com web : www.sicomin.com

Anexo B: Fichas técnicas dos extensômetros

FOIL STRAIN GAUGES
CAT. NO. 3008
5. 1981

RS 632-124 N11-MA2-120-11 2mm
RS 632-145 N11-MA2-120-23 2mm
RS 632-168 N11-MA5-120-11 5mm
RS 632-180 N11-MA5-120-23 5mm

RS 308-102 N11-FA8-120-11 8mm
RS 308-118 N11-FA8-120-23 8mm

FOIL STRAIN GAUGES AND ACCESSORIES (TERMINALS/CEMENT)

CODES FOR BASIC PATTERNS

N 	Q
R 	Y
T 	C
U 	X
Z 	P

CODES

FOR BASIC PATTERN COMBINATIONS

11 —	21 L	31 /		51
	22 +	32 *		
	23 			
	24 T	34 △	44 ◎	
		35 Y		

Y: Yielding type.

For measurement of large strains ranging to plastic sphere. Designed not to cause stress concentration at the point where leads are soldered.

C: For crack analysis.

Gauge grids are arranged in parallel. Gauge resistance increases in the form of stairs when a crack takes place somewhere within the grids.

X: For crack propagation detection.

With the lengthy grid of this gauge, cracks propagating extensively can be sensed.

P: For application to internal surface of pipes or threaded holes where gauges are difficult to install.

The test object is perforated for installation of this gauge inside. Note however that application is considerably critical as the gauge is likely to be damaged when installed or its performance is affected by air bubbles introduced during installation.

* W: Waterproof Moulded Type Strain Gauge

Vinyl cable (2 parallel wires of 1 mm. in external dia., resp.) is being connected with strain gauge and the gauge is moulded with special Epoxy resins. No special protection for waterproofing is necessary after its having been installed on the test object. This feature can be applied to all versions in Nxx-FA Series, except N34, N35 and N51.

Comportamento à mecânica da fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de juta

FEATURES :

- * Almost no effect on test object.
- * Distant and multi-points measurements are possible.
- * Applicable to both static and dynamic strains.
- * Both surfaces being completely laminated, the gauge grids are entirely protected.
- * The gauges, being fitted with leads, are easy to handle.

STANDARD SPECIFICATIONS :

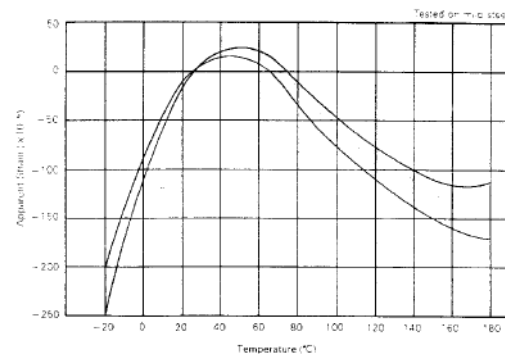
Gauge Length	0.3 mm. min. to 60 mm. max.
Measurable Strain	2 to 4% maximum. Up to 10% with foil yielding strain gauges.
Temperature Range	FA (Polyester Backing) -30°C to $+80^{\circ}\text{C}$ MA (Polyimide Backing) -30°C to $+180^{\circ}\text{C}$
Thermal Output (See Fig. 1)	FA: Within $\pm 2\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ (At room temperature up to $+80^{\circ}\text{C}$) MA: Within $\pm 2\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ (At room temperature up to $+160^{\circ}\text{C}$) Within $\pm 5\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ (At $+160^{\circ}\text{C}$ up to $+180^{\circ}\text{C}$)
Gauge Factor Change with Temperature (See Fig. 2)	Within $\pm 0.015\%/^{\circ}\text{C}$
Gauge Resistance Tolerance	Within $\pm 0.5\%$ of the nominal resistance.
Gauge Factor	2.00 (Nominal)
Gauge Factor Tolerance	Within $\pm 1\%$ of the value indicated on individual gauge packet for gauge lengths of 5 mm. to 60 mm. Within $\pm 2\%$ of the value indicated on individual gauge packet for gauge lengths of 0.3 mm. to 3 mm.
Fatigue Life	More than 10^5 reversals at 1000×10^{-6} strain.

CONFIGURATIONS :

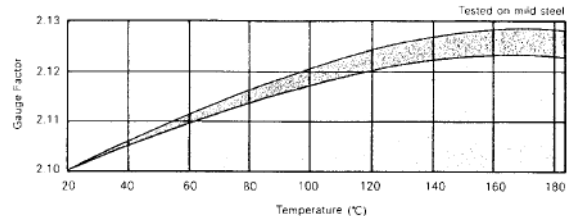
N11-FA-5-350-16-L03

GENERAL PERFORMANCES OF TYPE N11-MA-5-120-11 STRAIN GAUGE

Thermal Output Characteristics (Fig.1)



Gauge Factor variation with temperature (Fig. 2)



Optional Specifications

- 03 Length of Leads
- L Resin Clad Copper Wire (Up to 0.3m)
- W Waterproof Moulded Type* (See page 1)
- P Optional Pattern Type
(Subject to special quotations)

- Linear Expansion Factor of Material against which Strain Gauge is self-temperature compensated and its base colour classification

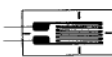
Base Colour	Materials against which strain gauge is self-temperature compensated	Linear expansion factor of materials	Codes
Red	Mild steel	$10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	11
Orange	Stainless steel	$16.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	16
Blue	Aluminium alloy	$23.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	23

Remarks : Base colour classifications are made in FA Series only.
Code of "11" for mild steel can be deleted.

- Gauge Resistance
Expressing strain gauge nominal resistance in the unit of Ω . Can be deleted when nominal resistance is 120Ω .
- Gauge Length
Expressing grid effective length in figures in the unit of mm.
- Foil Material
A: Cu-Ni Alloy
- Base Material
F: Polyester, M: Polyimide
- Basic Pattern and its Combinations

Comportamento à mecânica da fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de juta

PATTERNS AND SPECIFICATIONS :

Strain Gauge Pattern	Type	Nominal Resistance (Ω)	Dimensions(mm)				Approx. Gauge Factor	Material against which strain gauge is self temperature compensated			Compatible Cement				Number of Gauges per Packet
			Grid		Base			Mild Steel (11)	Stainless Steel (16)	Aluminum Alloy (23)	F1	F3	18M	E110	
			Length	Width	Length	Width									
	N11-FA-03-120-(11,16,23)	120	0.3	1.8	3.5	2.5	1.9	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 1-120-(11,16,23)	120	1.0	1.5	4.0	2.5	2.0	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 2- 60-(11)	60	2.0	1.6	6.0	2.5	2.0	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 2-120-(11,16,23)	120	2.0	1.6	6.0	2.5	2.0	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 2-350-(11,16,23)	350	2.0	2.2	7.0	3.5	2.0	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 5- 60-(11)	60	5.0	1.8	9.5	3.5	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 5-120-(11,16,23)	120	5.0	1.8	9.5	3.5	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 5-350-(11,16,23)	350	5.0	2.6	11.0	4.0	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 8-120-(11,16,23)	120	8.0	2.0	13.0	4.0	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA- 8-350-(11,16,23)	350	8.0	4.0	14.0	6.0	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA-10-120-(11,16,23)	120	10.0	2.2	15.0	5.0	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA-10-350-(11,16,23)	350	10.0	4.5	18.0	6.5	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA-10-600-(11)	600	10.0	3.0	16.0	5.0	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA-10-1000-(11)	1000	10.0	4.5	15.0	6.0	2.0	•	•	•	•	•	•		
	N11-FA-30-120-(11)	120	30.0	1.2	40.0	4.5	2.1	•	•	•	•	•	•		10
	N11-FA-60-120-(11)	120	60.0	2.2	65.0	5.5	2.1	•	•	•	•	•	•		
	N11-MA-03-120-(11,16,23)	120	0.3	1.8	3.5	2.5	1.9	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA- 1-120-(11,16,23)	120	1.0	1.5	4.0	2.5	2.0	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA- 2-120-(11,16,23)	120	2.0	1.6	6.0	2.5	2.0	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA- 2-350-(11)	350	2.0	2.2	7.0	3.5	2.0	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA- 5-120-(11,16,23)	120	5.0	1.8	9.5	3.5	2.1	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA- 5-350-(11)	350	5.0	2.6	11.0	4.0	2.1	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA- 8-120-(11,16,23)	120	8.0	2.0	13.0	4.0	2.1	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA- 8-350-(11)	350	8.0	4.0	14.0	6.0	2.1	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA-10-120-(11,16,23)	120	10.0	2.2	15.0	5.0	2.1	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA-10-350-(11)	350	10.0	4.5	18.0	6.5	2.1	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA-10-600-(11)	600	10.0	3.0	16.0	5.0	2.1	•	•	•	•	•	•	•	
	N11-MA-10-1000-(11)	1000	10.0	4.5	15.0	6.0	2.0	•	•	•	•	•	•	•	

INSTRUCTIONS

In order to obtain the best possible results from a strain gauge installation it is important that care and attention is given to the preparation of the gauge, the surface of the specimen, and bonding techniques.

Whilst circumstances may call for variations in technique for particular installations, the following instructions based on extensive experience, should ensure the complete success of the bonding of Showa foil strain gauges. In applications where it is considered there may be special problems, we will be pleased to give any advice and assistance we can.

1. Specimen Surface Preparation.

An area larger than the installation should be cleared of all paint, rust etc., and finally smoothed with a fine grade emery paper or fine sand blasting to provide a sound bonding surface. The area should now be degreased with a solvent such as trichlorethylene and finally neutralised with a weak detergent solution. One should use tissue for this operation, wetting the surface and wiping off with clean tissues until the final tissue used is stain free. Care must be taken not to wipe grease from a surrounding area onto the prepared area or to touch the surface with the fingers.

This final cleaning should take place immediately prior to installing the strain gauges.

2. Strain Gauge Preparation.

Normally the gauge is ready for applying as soon as it is removed from the packet but, experience shows that some engineers prefer to roughen the back of the gauge before applying it. Extreme care should be taken and the area under the tags should be avoided. One method is to sprinkle pumice powder onto a piece of blotting paper and with one finger tip lightly rub the back of the gauge over the powder. Remove all products of the abrasion and wipe back of gauge with a tissue.

Note: It is advisable not to mix the adhesive until all the gauges to be installed have been prepared to this stage.

3. Strain Gauge Installation.

By sticking a short length of sellotape lengthways along the upper face of the gauge it may be picked up from a flat clean surface. Holding both ends of the tape, orientate the gauge in the desired location and stick the end of the tape furthestmost from the tags, to the specimen. Bend the other end of the tape back on itself thereby exposing the

back of the gauge.

Adhesives.

Three basic types of adhesives are recommended: (1) Epoxy resin, (2) Phenol-Epoxy resin and (3) pressure sensitive (Cyanoacrylate series) adhesive.

The single component pressure sensitive adhesive is recommended where fast bond and thin glue are optimum requirements as this adhesive reacts immediately upon water contained in the atmospheric air.

For an installation where long term stability under adverse atmospheric conditions is the main requirement one should use Epoxy or Phenol-Epoxy system. F3 cement is simple to use and may be cured at ambient room temperature, whilst F1 cement has excellent heat resistance quality. E110 is most suitable for use with MA Series (Polyimide backing) gauges for high temperature application.

i) Epoxy Adhesives F1 and F3.

Coat the exposed back of the gauge with adhesive and gently push the gauge down into position, at the same time wiping excessive adhesive to the two outside edges of the gauge. Stick the whole length of the sellotape to hold the gauge in position, cover the area with the piece of polyethylene provided and apply a light weight or clamp as required. Care should be taken that there is an even layer of adhesive and no air bubbles are left under the grid. The installation is now ready for curing. After curing remove the tape as per para. 4.

F1	10 parts resin : 2 parts hardener	2 hrs. at 100°C
F3	10 parts resin : 6 parts hardener	24 hrs. at room temp.

Of this two pack adhesive, the base material (A) is inert, and this should be harmless when in contact with human tissue.

The hardener (B) is slightly toxic and can possibly be harmful if allowed in contact with human tissue.

Warning:

- 1. Do not allow the mixed or unmixed materials to contact skin. Protective gloves should be worn. Should skin be inadvertently contaminated it must be washed off immediately and thoroughly, with soap or detergent and water.*
- 2. If heat is applied to accelerate the cure time of the adhesive then adequate ventilation is necessary to avoid inhalation of resulting fumes.*

ii) Phenol-Epoxy Adhesive E110.

The cement is spread by brush or by spatula on both the specimen surface and strain gauges and these must then be left in this condition and dried in a clean atmosphere for 1 to 3 hours in order to allow evaporation of solvents from the cement. If cement is applied by spraygun, the cement should be diluted before it is applied, by methyl-ethyl-ketone until its solidity rate

Comportamento à mecânica da fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de juta

reaches to 20%. After drying, both the strain gauges and the specimen surface are contacted face to face and clamped and heated in an oven for 30 minutes at 140°C to complete bonding.

iii) Pressure Sensitive Adhesive 18M.

Follow strain gauge installation instructions as above sticking one end of the tape down to the specimen completely up to the gauge. Drop a fillit of adhesive in the 'hinge' formed by the gauge and the specimen. Starting at the fixed end with one finger push the gauge down at the same time pushing the adhesive along the gauge in a single wiping motion until the whole gauge is stuck down. Apply pressure with the finger over the whole length of the gauge for one minute. Extra attention may need to be given to the tag and lead wire area.

4. Removing the tape.

Remove the tape by slowly and very carefully pulling it back over itself starting at the end furthest from the tags. Do not pull upwards.

5. Wiring.

Showa strain gauges are fitted with short leads and it is standard practice to wire these to small stick-on or self adhesive terminals placed adjacent to the gauges. These serve as a bridge-completion point and a change-over point to the heavier wire required for the run to measuring or recording instruments.

The lead out wires from the gauges are fragile, and should be handled with care. Preparatory tinning of the ends of the leadout wires, connecting cables and terminals is recommended. Be sure to remove all traces of flux or soldering paste with trichlorethylene.

6. Installation Protection.

Showa strain gauges are encapsulated and therefore are protected from dust and draughts, etc. This encapsulation serves to make any required form of protection all the more efficient. In choosing a protective coating one should study completely the environment in which the installation is to function and the length of time the installation will be required to function in such environment. One should also pay special attention to the wiring especially if the installation is required to be immersed in water.

There are numerous forms of protection available and we will be pleased to advise you on your particular installation.

High Elongation (Yielding) Strain Gauges.

Generally speaking the foregoing instructions apply also for the bonding of high elongation gauges but there are some specific aspects of the technique which should be followed.

- a F3 or 18M cement is recommended, but in each case the layer of cement between the gauge and specimen surface must be as thin and uniform as possible.
- b It is desirable not to apply any coating material to the installation. Silicone rubber, however, may be thinly applied if necessary.
- c Lead-out wires should be raised and looped in order to keep them free from strains taking place in the test object.
- d Terminals should be used and an excessive amount of solder on the terminals should be avoided.

"P" Series Gauge ("Pipe" Gauge)

This series is intended, for measurement, to be inserted into the test object. Care should be exercised for the handling and installation of this gauge especially when carrying the gauge into the hole prepared on the test object. Removal of air bubbles from the adhesive mixture is also very important in order to prevent any damages from taking place on the gauge or to attain the better measuring results.

Brief instructions:—

- a Prepare a hole of 2.3 mm dia. on the test object.
- b F1 or F3 cement is used for "P" Series gauge. Apply a well mixed adhesive eliminating any air bubbles to the internal surface of that hole. Insert the gauge gently into the hole.
- c After having applied adhesive to the hole and placed the gauge in position, the adhesive is left cured as per para. 3.i).
- d Wire the strain gauge leads to terminals placed adjacent to the hole. Care should be given to the fact that the leads, if covered with splashes of adhesive, are likely to be broken.

Comportamento à mecânica da fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de juta

Specifications		
strain gage construction measuring grid material thickness carrier material thickness cover material thickness connections for strain gages without leads	μm μm μm	foil SG complete with embedded measuring grid Constantan foil 3.8 or 5, depending on strain gage type polyimide 45 \pm 10 polyimide 25 \pm 5 nickel plated Cu leads, approx. 30mm in length, integrated solder tabs, approx. 1.5mm in length, approx. 1.6 ... 2.2mm wide
nominal resistance resistance tolerance gage factor nominal value of the gage factor gage factor tolerance for 0.6mm and 1.5mm measuring grid length for ≥ 3 mm measuring grid length temperature coefficient of the gage factor nominal value of the temperature coefficient of the gage factor	Ω % % % 1/K	120, 350, 700, or 1000, depending on SG type ± 0.3 without; ± 0.35 with leads) approx. 2 specified on each package ± 1.5 ± 1 approx. $(115 \pm 10) \cdot 10^{-6}$ specified on each package
reference temperature operating temperature range for absolute, i.e. zero point related measurements for relative, i.e. not zero point related measurements	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$	23 -70 ... + 200 -200 ... + 200
transverse sensitivity within reference temperature range using adhesive Z 70 on strain gage type LY 11-6/120	%	specified on each package - 0.1
temperature response temperature response at customer's choice matched to the thermal expansion coefficient α for ferritic steel α for aluminum α for plastic material α for austenitic steel α for titanium/ gray steel α for molybdenum α for quartz tolerance of the temperature response temperature response with matching in the range of ³⁾	1/K 1/K 1/K 1/K 1/K 1/K 1/K 1/K 1/K $^{\circ}\text{C}$	specified on each package 10.8 $\cdot 10^{-6}$ 23 $\cdot 10^{-6}$ 65 $\cdot 10^{-6}$ 16 $\cdot 10^{-6}$ 9 $\cdot 10^{-6}$ 5.4 $\cdot 10^{-6}$ 0.5 $\cdot 10^{-6}$ $\pm 0.3 \cdot 10^{-6}$ -10... + 120
mechanical hysteresis ¹⁾ at reference temperature and strain $\epsilon = \pm 1,000 \mu\text{m/m}$ on strain gage type LY 11-6/120 at 1st load cycle and adhesive Z 70 at 3rd load cycle and adhesive Z 70 at 1st load cycle and adhesive X 60 at 3rd load cycle and adhesive X 60 at 1st load cycle and adhesive EP 250 at 3rd load cycle and adhesive EP 250	$\mu\text{m/m}$ $\mu\text{m/m}$ $\mu\text{m/m}$ $\mu\text{m/m}$ $\mu\text{m/m}$ $\mu\text{m/m}$	1 0.5 2.5 1 1 1
maximum elongation ¹⁾ at reference temperature using adhesive Z 70 on strain gage type LY 11-6/120 absolute strain value ϵ for positive direction absolute strain value ϵ for negative direction	$\mu\text{m/m}$ $\mu\text{m/m}$	50,000 ($\Delta 5$ %) 50,000 ($\Delta 5$ %)
fatigue life ¹⁾ at reference temperature using adhesive X 60 on strain gage type LY 11-6/120 number of load cycles L_W at alternating strain $\epsilon_W = \pm 1,000 \mu\text{m/m}$ and zero point drift $\epsilon_m \Delta \leq 300 \mu\text{m/m}$ $\epsilon_m \Delta \leq 30 \mu\text{m/m}$		$>> 10^7$ (test was interrupted at 10^7) $> 10^7$ (test was interrupted at 10^7)
minimum radius of curvature, longitudinal and transverse, at reference temperature for strain gages with leads for strain gages with integrated solder tabs within the measuring grid area within the area of the solder tabs bonding material that can be used cold curing adhesives hot curing adhesives	mm mm mm	0.3 0.3 2 Z 70; X 60; X 280 EP 250; EPS 310S

¹⁾ The data depend on the various parameters of the specific application and are therefore stated for representative examples only.

²⁾ With measuring grid lengths of 0.6 mm, the nominal resistance may deviate by $\pm 1\%$. For the types LY 51/ LY5x the deviation is $\pm 0.75\%$. For XY9x, RY9x and the KY types (per chain) it is $\pm 0.5\%$.

³⁾ Matching to plastic (code number 8) is only possible in the temperature range of $-10...+50^{\circ}\text{C}$.



Comportamento à mecânica da fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de juta

Stock types		Variants	No-mi-nal resistance	Dimensions (mm) [1 inch = 25.4 mm]				Max. perm. effective bridge excitation voltage	Solder terminals (1)
				Measuring grid		Measuring grid carrier			
Steel	Aluminum	Others		Ω	a	b	c		
1-XY31-0.6/120		1-XY3x-0.6/120#	120	0.6	1	7	6	1.5	LS7
1-XY31-1.5/120	1-XY33-1.5/120	1-XY3x-1.5/120	120	1.5	1.5	8	6.3	3	LS7
1-XY31-3/120		1-XY3x-3/120	120	3	2.8	10.5	8	5.5	LS7
1-XY31-6/120		1-XY3x-6/120	120	6	5.8	17.5	12	11	LS4
1-XY31-1.5/350	1-XY33-1.5/350	1-XY3x-1.5/350#	350	1.5	1.2	7.7	6.3	5	LS7
1-XY31-3/350	1-XY33-3/350	1-XY3x-3/350	350	3	2.9	10.9	7.6	10	LS5
1-XY31-6/350	1-XY33-6/350	1-XY3x-6/350	350	6	5.7	18	12	20	LS4

(1) Solder terminals are not compulsory
Types marked # are only available with matching to aluminum, ferritic or austenitic steel

XY31

0°/90° T rosette
Temperature response matched to steel
with $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6}/K$

XY33

Temperature response matched to aluminum
with $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$

XY3x

Temperature response matching at customer's choice,
see page 20

Illustrations show actual size
(Grid length in mm)



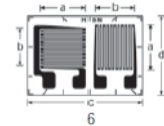
0.6



1.5

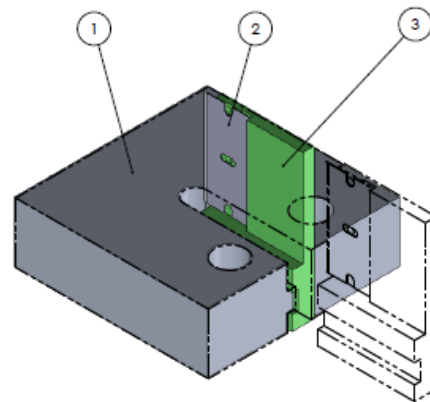
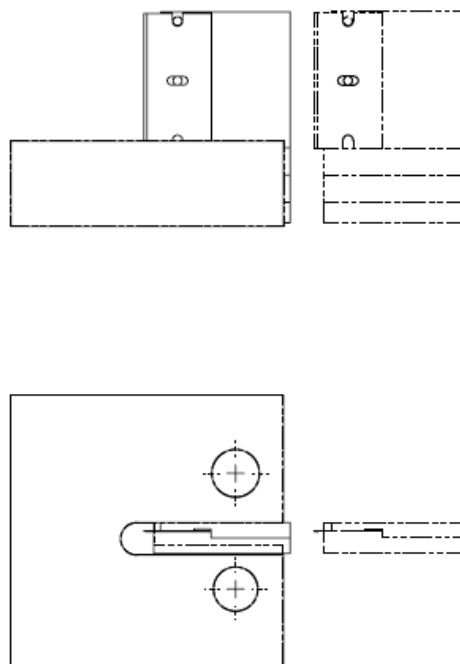


3



Contents per package: 5 pcs.

Anexo C: Suporte para a abertura da pré-fenda



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	Fechado/GTY.
1	Corte CT	Base de corte	1
2	lamina	Lâmina de corte	1
3	Suporte_lamina	Suporte móvel da lâmina	1